



André Manuel Gomes Rodrigues

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

Análise da Qualidade da Ventilação em Salas de Aula

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia Civil

Orientador: Daniel Aelenei, Professor Auxiliar,
Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Doutora Maria Teresa G. Santana

Arguente: Doutor Luís Gonçalo Correia Baltazar

Vogal: Doutor Daniel Aelenei



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Novembro 2017

“O degrau da escada não foi inventado para repousar, mas para sustentar o pé o tempo necessário para que o homem coloque o outro pé um pouco mais alto.”

Aldous Huxley

Aos meus pais.

“Copyright” André Manuel Gomes Rodrigues, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado critério ao autor e editor.

Agradecimentos

Este trabalho é o culminar de um ciclo que só foi concretizado devido à colaboração e apoio de um conjunto de pessoas com quem me cruzei e tive a sorte de privar. A todos aqueles que contribuíram para a realização desta dissertação quero manifestar o meu sincero agradecimento.

Ao meu orientador, Professor Doutor Daniel Aelenei, pelos conhecimentos transmitidos e pela disponibilidade e simpatia, não só na realização desta dissertação, mas também durante o meu percurso académico.

Aos meus colegas e amigos de faculdade, Carolina Carmo, Filipa Santos, Gonçalo Pinheiro, Margarida Ferreira, Marta Monteverde, Miguel Henriques, Nuno Peres e Sofia Lopes, por toda a amizade, ajuda e companheirismo prestados ao longo de todo o meu percurso na faculdade.

Aos meus amigos do Papais com Chantilly por todos os momentos de alegria, cumplicidade e incentivo durante a realização desta etapa.

Aos meus grandes amigos Ana Raquel, Bruno Amoroso e José Miguel por terem sido tão importantes ao longo de toda a minha vida. Vocês serão sempre como irmãos para mim.

À minha namorada e companheira para a vida, Ana Filipa, por todo o amor, carinho, apoio e paciência incondicional ao longo de todos estes anos. Por me desafiar e incentivar todos os dias para conseguir mais e melhor e por toda a preciosa ajuda a realizar esta dissertação.

À minha família, em especial aos meus pais e irmãos, pelo apoio incondicional, pelo amor e compreensão demonstrados ao longo de toda a minha vida. Obrigado por todos os sacrifícios e privações que tiveram de suportar para me darem a oportunidade de realizar esta etapa tão importante na minha vida.

Resumo

Numa sociedade em que a generalidade da população desempenha, durante longos períodos de tempo, atividades confinadas a espaços fechados, a qualidade do ar interior assume-se como uma preocupação crescente no conforto e qualidade de vida da mesma. Uma das abordagens a esta temática passa pelo estudo da ventilação que, apesar de se definir como um dos fatores principais na influência da qualidade do ar interior, desempenha também um papel importante no conforto térmico e no desempenho energético dos edifícios.

Face a esta preocupação e, simultaneamente, à escassez de estudos sobre ventilação em salas de aula, esta dissertação pretende analisar a qualidade da ventilação em salas de aula da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa.

Para a elaboração deste estudo, procedeu-se à seleção e análise de dois edifícios e de oito salas desta universidade, tendo como objetivo estimar as suas taxas de ventilação natural e avaliar os resultados, comparando-os com a legislação atualmente em vigor. Esta análise teve por base uma campanha experimental onde foi utilizado o Método do Gás Traçador e a Técnica do Decaimento, com recurso ao dióxido de carbono produzido pelo metabolismo dos ocupantes, durante o período de aulas. A campanha experimental decorreu no período de 7 de novembro a 16 de dezembro de 2016, sendo que cada ensaio se realizou com uma monitorização contínua da concentração de dióxido de carbono e com as portas e janelas fechadas.

Com base nos resultados obtidos das taxas de renovação horária e da concentração de dióxido de carbono, realizou-se uma análise crítica da qualidade do ar dentro dos compartimentos estudados.

Palavras-chave: Qualidade do Ar Interior, Ventilação natural, Taxa de renovação horária, Método do Gás Traçador, Universidade.

Abstract

In a society where the majority of the population performs activities confined to enclosed spaces for long periods of time, indoor air quality becomes an increasing concern in the comfort and quality for the life of the population. One of the approaches to this theme is the study of ventilation, which, although defined as one of the main factors influencing indoor air quality, also plays an important role in the thermal comfort and energy performance of buildings.

Regarding this concern and, simultaneously, the scarcity of studies on ventilation in classrooms, this dissertation intends to analyse the quality of ventilation in classrooms of the Faculty of Sciences and Technologies of the New University of Lisbon.

For the preparation of this study, two buildings and eight rooms of this university have been selected and analysed, aiming to estimate their natural ventilation rates and evaluate the results, comparing them with the current legislation. This analysis was based on an experimental campaign in which the Tracer Gas Method and the Decay Technique were used, using the carbon dioxide produced by the metabolism of the occupants during the class period. The experimental campaign lasted from November 7 to December 16, 2016, with each test carried out with continuous monitoring of carbon dioxide concentration and closed doors and windows.

Based on the results obtained from the air change rate and carbon dioxide concentration levels, it was performed a critical analysis of air quality within the compartments studied.

Keywords: Indoor Air Quality, Natural Ventilation, Air Change Rate, Tracer Gas Method, University.

Índice de Matérias

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento do Tema.....	1
1.2	Objetivos da Dissertação	2
1.3	Organização e Estrutura da Dissertação	3
2	Ventilação dos edifícios	5
2.1	Fundamentos Teóricos.....	5
2.2	Conceitos de Ventilação.....	8
2.3	Estratégias de Ventilação Natural.....	14
2.3.1	Ventilação Unilateral.....	14
2.3.2	Ventilação Cruzada	15
2.3.3	Ventilação por Gradiente Térmico	16
2.4	Taxa de Ventilação	17
2.5	Quadro Legal em Portugal.....	19
2.6	População Universitária em Portugal.....	21
3	Método do Gás Traçador.....	23
3.1	Fundamentos Teóricos do Método do Gás Traçador	23
3.2	Características de um Gás Traçador	25
3.3	Técnicas de Medição Usadas no Método do Gás Traçador.....	27
3.3.1	Técnica do Decaimento.....	28
3.3.2	Técnica da Emissão Constante.....	31
3.3.3	Técnica da Emissão Constante com Recolha Passiva – PFT	32
3.3.4	Técnica do Estado Estacionário	33
3.4	Avaliação dos Erros de Medição	34
3.5	Determinação da Taxa de Produção Metabólica de Dióxido de Carbono	34
4	Metodologia de Trabalho	37
4.1	Caracterização da Universidade e dos Edifícios Seleccionados	37

4.2	Caracterização das Salas de Aula.....	39
4.3	Descrição dos Métodos de Medições.....	43
5	Apresentação e Análise dos Resultados.....	47
5.1	Tratamento dos dados	47
5.1.1	Edifício VIII	47
5.1.2	Edifício IX	55
5.2	Análise Comparativa com a Regulamentação em Vigor	64
5.3	Análise dos Resultados Concentração de Dióxido de Carbono.....	70
6	Conclusões e Desenvolvimentos Futuros	77
	Referências Bibliográficas	81
	Apêndices.....	86

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Percentagem de desempenho em função da percentagem de ocupantes insatisfeitos com a qualidade do ar.....	2
Figura 2.1 – Distribuições de pressão resultante da ação do vento.....	11
Figura 2.2 – Interferência no escoamento de dois edifícios lado a lado e distribuição de pressões em torno de um deles.....	12
Figura 2.3 – Pressão induzida por ação térmica entre duas aberturas.	13
Figura 2.4 – Fluxos de ar devidos à ação térmica.	13
Figura 2.5 – Ventilação unilateral ($W_{\text{máx}} \approx 2,5H$).	15
Figura 2.6 – Ventilação cruzada ($W_{\text{máx}} \approx 5H$).	16
Figura 2.7 – Ventilação por gradiente térmico.	17
Figura 2.8 – Evolução das taxas de ventilação mínimas nos EUA.	18
Figura 2.9 – Alunos matriculados no ensino superior.	22
Figura 2.10 – Oferta educativa de Ensino Superior.	22
Figura 3.1 – Técnica do decaimento, a) decaimento da concentração do gás traçador, b) gráfico do logaritmo da concentração.....	29
Figura 3.2 – Esquema ilustrativo de posicionamento de ventiladores.	30
Figura 3.3 – Variação da função exponencial $[1 - e - QV \cdot t]$ com o tempo para diferentes taxas de renovação do ar.	31
Figura 3.4 – Cápsula emissora e cápsula recetora PFT, respetivamente.	32
Figura 4.1 – Localização da FCT/UNL.	37
Figura 4.2 – Planta do <i>campus</i> da FCT/UNL.	38
Figura 4.3 – Edifícios escolhidos para o presente estudo. À esquerda o Edifício VIII e à direita o Edifício IX.....	39
Figura 4.4 – Exemplo ilustrativo do sistema de sombreamento e do tipo de janela do Edifício VIII.....	41
Figura 4.5 - Exemplo ilustrativo do tipo de janela presente na Sala IX_2.23.	41
Figura 4.6 – Representação esquemática da circulação do vento na fachada da sala 2.23 do Edifício IX.....	42

Figura 4.7 – Exemplo ilustrativo do sistema de sombreamento e do tipo de janela do Edifício IX.....	42
Figura 4.8 – Exemplo de localização do retroprojektor, sala VIII_4.6.....	44
Figura 4.9 – Medidor laser de distâncias DLE 70 Professional.....	44
Figura 4.10 – Detetor de CO ₂ Telaire 7001 e <i>data logger</i> Hobo U12.....	45
Figura 5.1 – Dados recolhidos nos dias 24 e 25 de novembro de 2016 na sala VIII_3.4 ...	47
Figura 5.2 – Gráfico da regressão linear da sala VIII_3.4.....	48
Figura 5.3 – Representação da curva experimental e das curvas teóricas de concentração de CO ₂ da sala VIII_3.4.....	49
Figura 5.4 – Dados recolhidos nos dias 23 e 24 de novembro de 2016 na sala VIII_3.9 ...	49
Figura 5.5 – Gráfico da regressão linear da sala VIII_3.9.....	50
Figura 5.6 – Representação da curva experimental e das curvas teóricas de concentração de CO ₂ da sala VIII_3.9.....	51
Figura 5.7 – Dados recolhidos nos dias 12 e 13 de dezembro de 2016 na sala VIII_4.6....	51
Figura 5.8 – Dados recolhidos nos dias 24 e 25 de novembro de 2016 na sala VIII_4.8 ...	53
Figura 5.9 – Gráfico da regressão linear da sala VIII_4.8.....	54
Figura 5.10 – Representação da curva experimental e das curvas teóricas de concentração de CO ₂ da sala VIII_4.8.....	55
Figura 5.11 – Dados recolhidos nos dias 21 e 22 de novembro de 2016 na sala IX_2.23 ..	55
Figura 5.12 – Gráfico da regressão linear da sala IX_2.23.....	56
Figura 5.13 – Representação da curva experimental e das curvas teóricas de concentração de CO ₂ da sala IX_2.23	57
Figura 5.14 – Dados recolhidos nos dias 22 e 23 de novembro de 2016 na sala IX_3.19 ..	57
Figura 5.15 – Gráfico da regressão linear da sala IX_3.19.....	58
Figura 5.16 – Representação da curva experimental e das curvas teóricas de concentração de CO ₂ da sala IX_3.19	59
Figura 5.17 - Dados recolhidos nos dias 22 e 23 de novembro de 2016 na sala IX_4.15...	60
Figura 5.18 – Gráfico da regressão linear da sala IX_4.15.....	61
Figura 5.19 – Representação da curva experimental e da curva teórica de concentração de CO ₂ da sala IX_4.15.....	61
Figura 5.20 – Dados recolhidos nos dias 7, 8 e 9 de dezembro de 2016 na sala IX_4.23...	62

Figura 5.21 – Gráfico da regressão linear da sala IX_4.23.....	63
Figura 5.22 – Representação da curva experimental e da curva teórica de concentração de CO ₂ da sala IX_4.23.....	63
Figura 5.23 - Representação da evolução de caudal de ar novo, disponível para cada pessoa, na Sala VIII_3.4 ao longo da semana.....	65
Figura 5.24 - Representação da evolução de caudal de ar novo, disponível para cada pessoa, na Sala VIII_3.9 ao longo da semana.....	65
Figura 5.25 - Representação da evolução de caudal de ar novo, disponível para cada pessoa, na Sala VIII_4.8 ao longo da semana.....	66
Figura 5.26 - Representação da evolução de caudal de ar novo, disponível para cada pessoa, na Sala IX_2.23 ao longo da semana.....	67
Figura 5.27 - Representação da evolução de caudal de ar novo, disponível para cada pessoa, na Sala IX_3.19 ao longo da semana.....	67
Figura 5.28 - Representação da evolução de caudal de ar novo, disponível para cada pessoa, na Sala IX_4.15 ao longo da semana.....	67
Figura 5.29 - Representação da evolução de caudal de ar novo, disponível para cada pessoa, na Sala IX_4.23 ao longo da semana.....	67
Figura 5.30 – Comparação das concentrações de CO ₂ medidas nos ensaios com os limites estabelecidos pela RECS e pela ASTM.....	71
Figura 5.31 – Representação de curvas de concentração de CO ₂ para diferentes taxas de renovação horária na Sala VIII_3.4.....	72
Figura 5.32 – Representação de curvas de concentração de CO ₂ para diferentes taxas de renovação horária na Sala VIII_3.9.....	72
Figura 5.33 – Representação de curvas de concentração de CO ₂ para diferentes taxas de renovação horária na Sala VIII_4.8.....	72
Figura 5.34 – Representação de curvas de concentração de CO ₂ para diferentes taxas de renovação horária na Sala IX_2.23.....	74
Figura 5.35 – Representação de curvas de concentração de CO ₂ para diferentes taxas de renovação horária na Sala IX_3.19.....	74
Figura 5.36 – Representação de curvas de concentração de CO ₂ para diferentes taxas de renovação horária na Sala IX_4.15.....	74

Figura 5.37 – Representação de curvas de concentração de CO ₂ para diferentes taxas de renovação horária na Sala IX_4.23.....	74
--	----

Índice de Quadros

Quadro 2.1 – Fontes e efeitos na saúde de poluentes que afetam a qualidade do ar interior.	6
Quadro 2.2 – Concentrações máximas de referência de poluentes no interior dos edifícios.	8
Quadro 2.3 – Exemplos de sistemas de ventilação mecânica.....	9
Quadro 2.4 – Caudal de ar novo mínimo determinado em função da carga poluente devida à ocupação.....	21
Quadro 3.1 – Qualidade de alguns gases mais frequentemente utilizados.	26
Quadro 3.2 – Taxa de metabolismo em função do tipo de atividade física.	35
Quadro 3.3 – Área de Dubois em função da idade dos ocupantes e parcela a adicionar à atividade metabólica função da faixa etária.	36
Quadro 4.1 – Principais características das salas de aula	40
Quadro 4.2 – Ocupação das salas de aula no total e em média ao longo da semana no período de setembro a dezembro de 2016.	43
Quadro 4.3 – Especificações técnicas do detetor de CO ₂ - Telaire 7001.....	45
Quadro 4.4 – Especificações técnicas do <i>data logger</i> Hobo U12.....	46
Quadro 5.1 – Valores médios das renovações por hora das salas em estudo.....	64
Quadro 5.2 – Número de alunos inscritos, no período de novembro a dezembro de 2016, nas disciplinas lecionadas nas salas estudadas.....	65
Quadro 5.3 – Comparação dos caudais de ar novo por ocupante com a regulamentação portuguesa.....	69
Quadro 5.4 – Comparação das R_{ph} experimentais e as R_{ph} necessárias para cumprir legislação	70

Siglas e Símbolos

Siglas

ADENE	Agência para a Energia	
APA	Agência Portuguesa do Ambiente	
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers</i>	
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado	
AIVC	<i>Air Infiltration and Ventilation Centre</i>	
DGES	Direção-Geral do Ensino Superior	
DL	Decreto Lei	
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologias	
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil	
NP	Norma Portuguesa	
PFT's	<i>Volatile per fluoro tracers</i>	
QAI	Qualidade do ar interior	
RCCTE	Regulamento das Características de Conforto Térmico dos Edifícios	
RECS	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços	
REGEU	Regulamento Geral das Edificações Urbanas	
REH	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação	
RSECE	Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios	
RTHS	Recomendações Técnicas para Habitação Social	
SCE	Sistemas de Certificação Energética de Edifícios	
UNL	Universidade Nova de Lisboa	
WHO	<i>World Health Organization</i>	

Símbolos

CO_2	Dióxido de carbono	-
p_w	Pressão do vento sobre determinado ponto da superfície do edifício	Pa
C_p	Coeficiente de pressão devido a ação do vento	-

ρ_0	Massa volúmica do ar à temperatura e pressão de referência	kg/m ³
T	Temperatura	°C
T_0	Temperatura de referência	°C
v	Velocidade do vento à cota considerada	m/s
C_p	Coeficiente de pressão pela ação do vento	-
p	Pressão estática em determinado ponto da superfície	Pa
p_0	Pressão estática de referência	Pa
R_{ph}	Renovações por hora	h ⁻¹
Q	Caudal volúmico de ventilação	m ³ .h ⁻¹
V	Volume efetivo do espaço	m ³
c_{ext}	Concentração volúmica do gás traçador no exterior	-
c	Concentração volúmica do gás traçador no interior no instante t	-
t	Tempo	s ou h
G	Caudal volúmico de emissão de gás traçador no interior	m ³ /s
c_0	Concentração volúmica do gás traçador no interior no instante $t=0s$	ppm
n	Número de medições	-
τ_n	Constante de tempo nominal	h
G	Taxa de injeção constante do gás traçador	m ³ /s
\bar{c}	Concentração média de gás traçador	ppm
G_{CO_2}	Valor da taxa total de geração de CO ₂	m ³ /h
A_{Du}	Área de DuBois da superfície corporal	m ²
M	Taxa de metabolismo dos ocupantes	met
N	Número de ocupantes do espaço	-
W_b	Massa corporal típica	kg
H_b	Altura típica do corpo humano	m
R^2	Coeficiente de determinação	-

HR	Humidade relativa	%
ln	Logaritmo natural	-

Capítulo 1

Introdução

No presente capítulo é apresentado o enquadramento do tema evidenciando a importância e influência da qualidade do ar interior na qualidade de vida das pessoas. Definem-se os objetivos em que este estudo se baseia e apresenta-se, sucintamente, a estrutura geral deste documento.

1.1 Enquadramento do Tema

Até meados da década de setenta do século vinte, a generalidade dos países ocidentais manifestavam pouca preocupação no uso racional de energia, já que esta apresentava baixos custos para os mesmos. Nesta perspetiva, o acesso a energia a baixo custo permitiu um aumento do nível de vida da população portuguesa, conduzindo a uma maior exigência de conforto a nível habitacional.

O paradigma alterou-se com as crises petrolíferas de 1973 e 1979 resultando na subida dos custos energéticos [1]. Assim, Portugal foi forçado a implementar uma política de redução do consumo de recursos energéticos, em virtude da sua dependência energética de combustíveis fósseis importados. As novas políticas energéticas levaram, entre outras medidas, à adoção de novas práticas construtivas que se focavam em tornar o edifício num espaço mais fechado, aumentando o isolamento térmico e diminuindo as infiltrações de ar, responsáveis pelas perdas de calor e consequente aumento da fatura energética. Estas medidas, apesar de eficazes do ponto de vista do aproveitamento energético, não tiveram em consideração os possíveis efeitos secundários inerentes ao isolamento de um edifício. Por conseguinte, se por um lado o isolamento térmico de um edifício reduz o consumo energético nas estações de aquecimento, por outro a diminuição das infiltrações despromove indiretamente a qualidade do ar interior (QAI).

É indiscutível que a qualidade de vida da população é indissociável da qualidade do ar que esta respira. Nas sociedades contemporâneas, em que a população passa cerca de 90% do seu tempo em espaços fechados [2], a QAI dos edifícios assume especial relevância. Diversos estudos comprovam que a respiração de ar poluído provoca efeitos negativos na saúde e

influencia a produtividade dos estudantes, como ilustra a Figura 1.1 [3, 4, 5, 6]. Esta relação é já reconhecida como um problema, uma vez que vários investigadores se debruçam sobre este tema e nos seus estudos realizados demonstram a existência de elevadas concentrações de dióxido de carbono (CO_2) em edifícios públicos, nomeadamente em creches e lares de idosos [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]. É de salientar que níveis elevados de CO_2 estão, frequentemente, relacionados com elevados níveis de concentrações de outros poluentes como por exemplo o monóxido de carbono, ozono e compostos orgânicos voláteis [15].

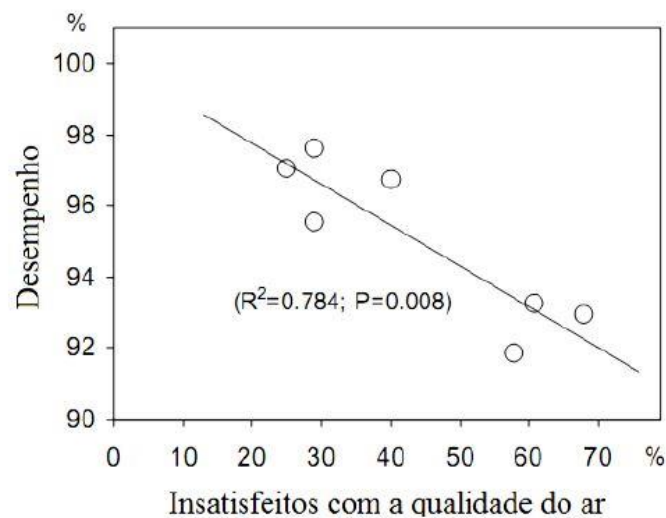


Figura1.1 – Percentagem de desempenho em função da percentagem de ocupantes insatisfeitos com a qualidade do ar (retirado de [16]).

A raridade de estudos que avaliam a qualidade da ventilação em salas de aulas nas universidades revela-se evidente, porventura por se considerar que a população jovem e adulta se encontra menos suscetível aos problemas inerentes a uma má QAI.

Com o aumento anual do número de alunos a ingressar nas universidades portuguesas, 42958 alunos colocados no ano 2016 [17], torna-se importante estudar os efeitos da respiração de ar poluído nos alunos e compreender se as salas de aula das universidades se encontram de acordo com a legislação portuguesa em vigor relativamente à renovação do ar interior.

1.2 Objetivos da Dissertação

O presente trabalho tem como objetivo estimar as taxas de ventilação de oito salas de aula de dois edifícios da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa e avaliar os resultados obtidos comparativamente com a legislação atualmente em vigor.

As taxas de renovação horária foram determinadas experimentalmente, pelo método do gás traçador, recorrendo à técnica do decaimento e utilizando o dióxido de carbono produzido pelo metabolismo dos ocupantes durante o período de aulas. Recorreu-se ao programa EXCEL da Microsoft para organizar os dados e para estimar as taxas de renovação horária pelo método dos mínimos quadrados, presente na ferramenta de regressão linear.

A avaliação dos resultados baseou-se nas taxas de renovação horária das salas em estudo e nos valores máximos de concentração de dióxido de carbono registados na campanha experimental e no levantamento preliminar.

Com a realização deste trabalho espera-se que os resultados obtidos possam contribuir para o aprofundamento do estudo desta temática.

1.3 Organização e Estrutura da Dissertação

Esta dissertação é composta por seis capítulos. O primeiro corresponde ao presente capítulo onde apresento o enquadramento do tema e os objetivos do estudo.

O segundo capítulo foca-se na ventilação dos edifícios e apresenta alguns fundamentos teóricos referentes à importância da qualidade do ar interior, como é afetada e os seus limites legais em Portugal. Definem-se, também, os conceitos de ventilação, onde se destaca a ventilação natural, por ser a utilizada neste estudo, mostrando e explicando as suas diferentes estratégias. Por fim, aborda-se o conceito de taxa de ventilação seguido de uma breve história do quadro legal referente à ventilação de edifícios em Portugal e a situação da população universitária neste país.

No terceiro capítulo define-se o método do gás traçador e as suas técnicas de utilização, apresentando a equação que lhe serve de base. Enumeram-se as características de um gás traçador ressaltando o CO₂, por ser o gás utilizado no presente estudo. De seguida, são descritas e explicadas quatro técnicas de medição do gás traçador, avaliando brevemente as incertezas inerentes ao método. Por último, expõe-se o método de determinação da taxa de produção metabólica de CO₂.

O quarto capítulo explicita a metodologia aplicada no presente estudo. Começa-se por caracterizar a universidade, os edifícios e as salas estudadas. Descreve-se, também, o método de medição utilizado, incluindo a caracterização dos aparelhos de medição manuseados.

No quinto capítulo, referente à análise dos resultados, são apresentados e analisados os dados recolhidos durante os ensaios realizados. No final, efetua-se uma comparação das taxas de renovação horária obtidas e dos níveis de CO₂ registados, com a legislação em vigor.

Por fim, no sexto capítulo apresentam-se as conclusões do estudo, dando resposta aos objetivos inicialmente estabelecidos e refletindo sobre as dificuldades sentidas e possíveis desenvolvimentos futuros que este estudo poderia conduzir.

Capítulo 2

Ventilação dos edifícios

O presente capítulo aborda a ventilação dos edifícios e encontra-se organizado em seis secções distintas. Na primeira secção evidenciam-se alguns fundamentos teóricos referentes à importância da qualidade do ar interior, como esta é afetada e os seus limites legais em Portugal. A segunda secção diz respeito aos conceitos de ventilação onde são referidos os três tipos de ventilação – natural, mecânica e mista – e as suas características. Na terceira secção apresenta-se e explica-se as diferentes categorizações das estratégias de ventilação natural. Na quarta secção aborda-se o conceito de taxa de ventilação, os critérios que delimitam os seus valores e a equação da taxa de renovação horária. A quinta secção enuncia uma breve história do quadro legal referente à ventilação de edifícios em Portugal. Por fim, apresenta-se a situação da população universitária em Portugal.

2.1 Fundamentos Teóricos

O principal objetivo num projeto de ventilação de um edifício passa por promover e melhorar as suas condições interiores, com o intuito de alcançar um ambiente saudável através da garantia de boas condições de QAI e de conforto térmico. É imprescindível que estes dois fatores sejam ponderados de forma cuidada, uma vez que estão diretamente ligados. Políticas que promovam boas condições de QAI sem avaliarem o conforto térmico tendem a projetar edifícios com necessidades de aquecimento elevadas, originando grandes gastos energéticos. Por outro lado, políticas que promovam o conforto térmico sem considerarem a QAI tendem a projetar edifícios mais herméticos mas com baixas taxas de renovação de ar, o que resulta numa má QAI que pode dar origem ao “Síndrome de Edifício Doente” [18].

O conceito de “Síndrome de Edifício Doente” foi utilizado pela primeira vez, em 1982, pela Organização Mundial de Saúde (WHO – *World Health Organization*) para descrever um fenómeno caracterizado pelo aparecimento de determinados sintomas nos ocupantes do edifício, sendo que estes podem ser mitigados ou suprimidos ao abandonar o edifício. Os sintomas apresentados pelos ocupantes são os seguintes: irritação nos olhos, garganta seca e

sensação de comichão, eritema, dor de cabeça, elevada frequência de infecções respiratórias, tosse, fadiga, coriza, dificuldade em respirar, tonturas e náuseas [18].

A preocupação com a QAI está relacionada com a exposição dos seus ocupantes a uma variedade de poluentes presentes nos edifícios. As fontes de contaminação do ar interior dividem-se em três grandes grupos, pois podem ser provocadas: (1) pela atividade humana, (2) pelos materiais de construção e (3) por outros poluentes. Os principais agentes de contaminação do ar interior que apresentam maior destaque são: os compostos orgânicos, o dióxido de carbono, os formaldeídos, o monóxido de carbono e o vapor de água. Apesar destes agentes também existirem no exterior, devido à sua exposição prolongada e acumulação num espaço confinado, apresentam efeitos negativos no comportamento, bem-estar, produtividade e saúde dos ocupantes.

O Quadro 2.1 resume as principais fontes e efeitos na saúde dos poluentes mais relevantes que afetam a qualidade do ar interior.

Quadro 2.1 – Fontes e efeitos na saúde de poluentes que afetam a qualidade do ar interior (retirado de [16]).

Poluente	Principais fontes	Efeitos na saúde
Monóxido de Carbono (CO)	Processos de combustão (aquecedores, esquentadores, fogões, lareiras, braseiras); fumo de tabaco; escape de veículos	Carboxihemoglobinemia (impede a captação de oxigénio); dores de cabeça; náuseas; cansaço; efeitos no sistema nervoso central e do sistema cardiovascular
Dióxido de Carbono (CO ₂)	Ocupantes (suor/transpiração, respiração, digestão da boca, estômago e canal intestinal – Biofluentes); fumo de tabaco	Efeitos no sistema nervoso central e no sistema cardiovascular; dores de cabeça, irritação de olhos e garganta; fadiga; falta de ar
Formaldeído (HCHO)	Desinfetantes; pesticidas; produtos derivados da madeira; conservantes de madeira; isolantes, adesivos, colas e tintas; fumo de tabaco; material têxtil; solventes de lacas e resinas; materiais de construção; mobiliário	Irritação dos olhos e nariz, garganta e pele; problemas respiratórios; dores de cabeça; enjoos; fadiga
Compostos Orgânicos Voláteis (COV's)	Solventes; tintas; colas, resinas e vernizes; produtos de limpeza; desinfetantes, desodorizantes, perfume; inseticidas, pesticidas e fungicidas; material de construção; mobiliário; fumo de tabaco	Odores; sintomas de alergia; náuseas; leucemia; cancro da pele e pulmão; olhos vermelhos; secura das mucosas do nariz e garganta; dores de cabeça; fadiga; vertigens

Poluente	Principais fontes	Efeitos na saúde
Ozono (O ₃)	Fotocopiadoras; impressoras a laser; aparelhos de limpeza; reações fotoquímicas; desinfetantes da água	Problemas respiratórios; irritação nos olhos; dores de cabeça; alterações da vigilância e da atuação; reações asmáticas e alérgicas; secura da boca e garganta; pressão no peito e tosse
Partículas respiráveis (PM ₁₀)	Processos de Combustão; ocupantes; sistema AVAC; fumo de tabaco; papel	Problemas respiratórios; olhos secos; asma e alergias; irritação da pele e mucosas; doenças profissionais (metais); tosse e espirros
Radão (Rn)	Solo de zonas graníticas; materiais de construção; rochas graníticas por baixo do edifício	Cancro do pulmão
Bactérias, fungos, legionella	Sistemas AVAC; materiais de construção; têxteis; pólen; zonas húmidas do edifício; pelos, penas e excrementos de animais e insetos; ocupantes (bactérias); água estagnada	Alergias (rinite, sinusite, asma); infeções (tuberculose, pneumonia); efeitos irritantes (olhos, nariz, garganta e pele); dores de cabeça; febre; Irritação cutânea fadiga e dores musculares
Dióxido de azoto (NO ₂)	Produtos derivados da madeira; fumo de tabaco	Cancro
Benzeno (C ₆ H ₆)	Produtos derivados da madeira; fumo de tabaco	Cancro
Naftaleno (C ₁₀ H ₈)	Fumo de tabaco; naftalina	Irritação dos olhos; irritação do sistema respiratório

A QAI é um conceito bastante complexo e abrangente que depende de diversos fatores, nomeadamente: da velocidade do ar, da temperatura, da humidade relativa, da existência de odores, da concentração de microrganismos ou poeiras em suspensão no ar, entre outros. A sua qualidade tem de ser garantida cumprindo dois critérios, um de saúde e um sensorial. O critério de saúde baseia-se no valor limite de concentração das substâncias poluentes em função do tempo de permanência dos ocupantes no ambiente contaminado, procurando evitar que os poluentes atinjam valores de concentrações perigosas para a saúde dos ocupantes. O critério sensorial baseia-se no efeito sensorial provocado pelas substâncias ao ser humano, procurando satisfazer o critério de saúde mas mantendo um ambiente agradável [19].

Em Portugal, as concentrações máximas regulamentares para os agentes poluentes no interior dos edifícios é definida pela Portaria nº 353-A/2013 de 4 de dezembro. No Quadro 2.2 estão representados os agentes poluentes e os seus respetivos valores máximos de concentração de referência.

Quadro 2.2 – Concentrações máximas de referência de poluentes no interior dos edifícios (adaptado de [20]).

Parâmetro	Limiar de proteção ^(a)	Margem de tolerância ^(b) [%]
Partículas suspensas (fração PM ₁₀)	50 µg/m ³	100
Partículas suspensas (fração PM _{2,5})	25 µg/m ³	100
Dióxido de Carbono	2250 mg/m ³ 1250 ppm	30
Monóxido de Carbono	12,5 mg/m ³ 9 ppm	---
Formaldeído	100 µg/m ³ 0,08 ppm	---
Compostos Orgânicos Voláteis	600 µg/m ³	100
Radão ^(c)	400 Bq/m ³	---
Notas: (a) Os limiares de proteção dizem respeito a uma média de 8 horas; (b) As margens de tolerância previstas são aplicáveis a edifícios existentes e edifícios novos sem sistemas mecânicos de ventilação; (c) Pesquisa obrigatória para edifícios em zonas graníticas, nomeadamente no distrito de Braga, Vila Real, Porto, Guarda, Viseu e Castelo Branco.		

2.2 Conceitos de Ventilação

A ventilação de edifícios é o conjunto de processos que promovem, de forma controlada, os fluxos de ar entre o interior e o exterior. Neste sentido, caracteriza-se por ser o processo pelo qual é introduzida uma quantidade de ar novo no interior do edifício e retirado o ar viciado para o exterior, com o objetivo de promover o conforto e a saúde dos seus ocupantes. Para cumprir estes objetivos é necessário [19, 21]:

- garantir um fornecimento de ar que seja adequado ao metabolismo humano e que garanta a ocorrência de combustão completa no processo de queima de combustível;
- manter os valores da concentração das substâncias poluentes produzidas pelos ocupantes, equipamentos e/ou materiais de construção inferiores aos valores recomendados pela legislação em vigor;
- assegurar as condições de humidade relativa e temperatura adequadas para o conforto e saúde dos ocupantes;
- evitar movimentos de ar que possam estar na origem da sensação de desconforto por parte dos ocupantes.

É importante salientar que os métodos teóricos desenvolvidos e as técnicas experimentais utilizadas para os estudos de ventilação são, usualmente, representações simplificadas do que acontece na realidade. Embora existam boas razões para que tal aconteça, é necessário ter presente que os processos de ventilação são muito complexos e, por regra, não são passíveis de tratamento ou medição teórica exata [22].

Existem duas estratégias distintas de ventilação – mecânica e natural – que, quando combinadas, dão origem à ventilação mista. Estas estratégias de ventilação são realizadas através da existência de aberturas entre o interior e exterior do edifício.

A ventilação mecânica caracteriza-se pela renovação de ar promovida por ventiladores mecânicos que asseguram, de forma controlada e ininterrupta, o escoamento do ar entre aberturas de admissão de ar exterior e as aberturas de extração de ar ligadas a condutas. Esses sistemas apresentam-se, frequentemente, em duas tipologias: equipamentos simples, que apenas injetam ar no interior dos edifícios; e equipamentos mais complexos acoplados a sistemas de tubagens, que para além da injeção de ar também o condicionam [19, 22]. Em seguida, é apresentado de forma sucinta, no Quadro 2.3, os sistemas de ventilação mais comuns.

Quadro 2.3 – Exemplos de sistemas de ventilação mecânica (adaptado de [16]).

Estratégia	Descrição
Insuflação mecânica	Admissão de ar através de rede de condutas e ventiladores e exaustão de ar através de aberturas, frinchas ou grelhas, colocadas na envolvente ou condutas de ventilação natural. O sistema permite a utilização de pré-aquecimento e filtragem do ar de insuflação.
Extração mecânica localizada e individual	Admissão de ar através de aberturas, frinchas ou grelhas, colocadas na envolvente e extração de ar através de ventiladores independentes, nos compartimentos de serviço, cozinha e instalação sanitária. A extração é frequentemente descontínua, abrange somente um dos compartimentos de serviço e é individualizada para cada habitação.
Ventilação mecânica centralizada (VMC ou fluxo simples)	Admissão de ar através de aberturas, frinchas ou grelhas, colocadas na envolvente e extração de ar através de ventiladores, nos compartimentos de serviço, cozinha e instalação sanitária. A exaustão é frequentemente contínua e comum a todo o edifício (centralizada e controlada num único ponto).
Ventilação mecânica de duplo fluxo (sistemas equilibrados)	Admissão e extração de ar através de rede de condutas e ventiladores (o caudal de extração é ligeiramente superior ao caudal de insuflação). O sistema é frequentemente controlado num único ponto e permite a utilização de filtros de ar e permutadores de calor.

A ventilação natural nos edifícios provém das trocas de ar através de aberturas intencionais – janelas, chaminés, grelhas de ventilação – e aberturas acidentais – frinchas e fendas – que provocam a infiltração do ar [23].

O conceito de infiltração pode definir-se como o processo de escoamento incontrolável de ar através de aberturas intencionais ou acidentais na envolvente do edifício, podendo provocar diminuição no desempenho dos sistemas de ventilação e causar outros problemas, como o aumento do consumo energético [3, 19].

Uma das desvantagens do sistema de ventilação natural é a falta de controlo que se pode gerar durante a sua utilização, uma vez que este sistema acontece devido a diferenças de pressões entre o interior e o exterior do edifício provocadas pela ação do vento, pelo gradiente térmico ou pela combinação de ambos os efeitos.

Ação do Vento

A ação do vento caracteriza-se por ser o fenómeno que mais contribui para a ventilação natural dos edifícios em Portugal. O seu efeito resulta da variação de pressão causada pelo vento na envolvente do edifício, convertendo a energia cinética em pressão estática [19, 24]. De um modo geral, pode dizer-se que ocorrem pressões positivas nas fachadas do edifício expostas ao vento e pressões negativas nas restantes, como ilustra a Figura 2.1.

A influência do vento na ventilação depende, sobretudo, de dois fatores: da sua intensidade, que é condicionada pelo local e pela envolvente exterior; e da distribuição de pressões na envolvente do edifício, resultante da forma e orientação do mesmo em relação ao fluxo de ar [19].

Revela-se essencial conhecer as características e influências do vento nos sistemas de ventilação, pois conduzem a decisões mais acertadas e conscientes no que concerne à sua construção e dimensionamento. Por conseguinte, torna-se possível localizar zonas mais eficientes e favoráveis para aberturas de admissão de ar (pressão positiva) e extração de ar (pressão negativa).

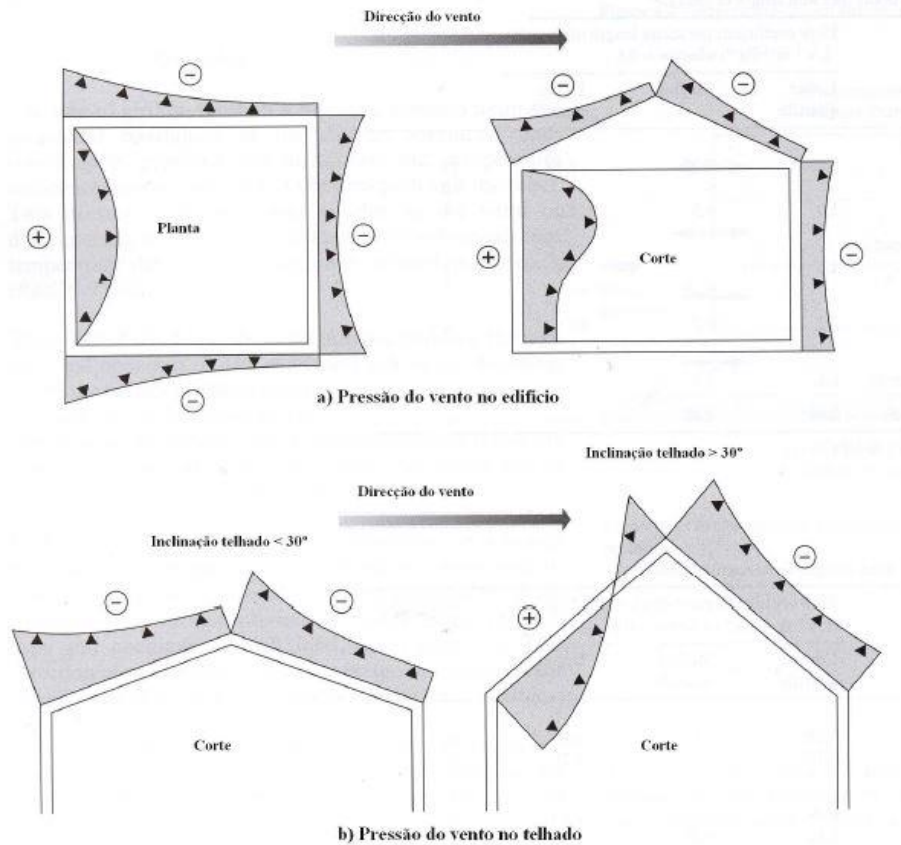


Figura 2.1 – Distribuições de pressão resultante da ação do vento (retirado de [24]).

A pressão do vento sobre as fachadas e coberturas do edifício é dada pela equação:

$$p_w = 0,5 \cdot C_p \cdot \rho_0 \cdot v^2 \quad (1.1)$$

Sendo:

p_w : pressão do vento sobre determinado ponto da superfície do edifício [Pa];

C_p : coeficiente de pressão devido a ação do vento [-];

ρ_0 : massa volúmica do ar à temperatura e pressão de referência, T_0 e p_0 [kg/m³];

v : velocidade do vento à cota considerada [m/s].

O coeficiente de pressão devido a ação do vento (C_p) depende: da direção e orientação do vento, da topografia e rugosidade do terreno, e dos obstáculos na vizinhança do edifício. Os valores dos coeficientes de pressão são dados pela equação:

$$C_p = \frac{p - p_0}{0,5 \cdot \rho_0 \cdot v^2} \quad (1.2)$$

Onde:

C_p : coeficiente de pressão pela ação do vento [-];

p : pressão estática em determinado ponto da superfície [Pa];

p_0 : pressão estática de referência [Pa];

ρ_0 : massa volúmica do ar à temperatura e pressão de referência, T_0 e p_0 [kg/m³];

v : velocidade do vento à cota considerada [m/s].

Um coeficiente de pressão positivo traduz-se numa pressão criada, que é superior à pressão estática do vento resultante da conversão da quantidade de movimento em pressão. Um coeficiente de pressão negativo refere-se a uma pressão negativa junto à superfície da fachada oposta ou paralela à direção do vento, ou seja, a pressão é inferior à pressão estática do vento em resultado dos vórtices criados pelas arestas das fachadas, como ilustrado na Figura 2.2.

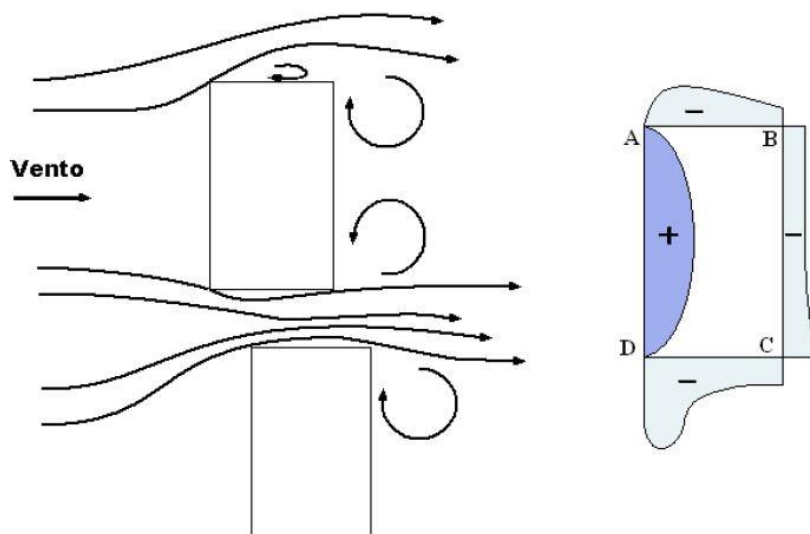


Figura 2.2 – Interferência no escoamento de dois edifícios lado a lado e distribuição de pressões em torno de um deles (retirado de [25]).

Gradiente de Temperatura

O gradiente térmico, mais conhecido por efeito chaminé, é a circulação de caudais de ar devido à diferença de temperatura e de densidade do ar de dois espaços. Existindo comunicação entre os espaços, por aberturas a diferentes cotas, é induzida uma diferença de pressão que depende da diferença de temperatura e da diferença de cotas entre as aberturas.

A Figura 2.3 descreve, a título de exemplo, o processo de movimentação de ar induzido por ação térmica através de duas aberturas verticais situadas no mesmo plano.

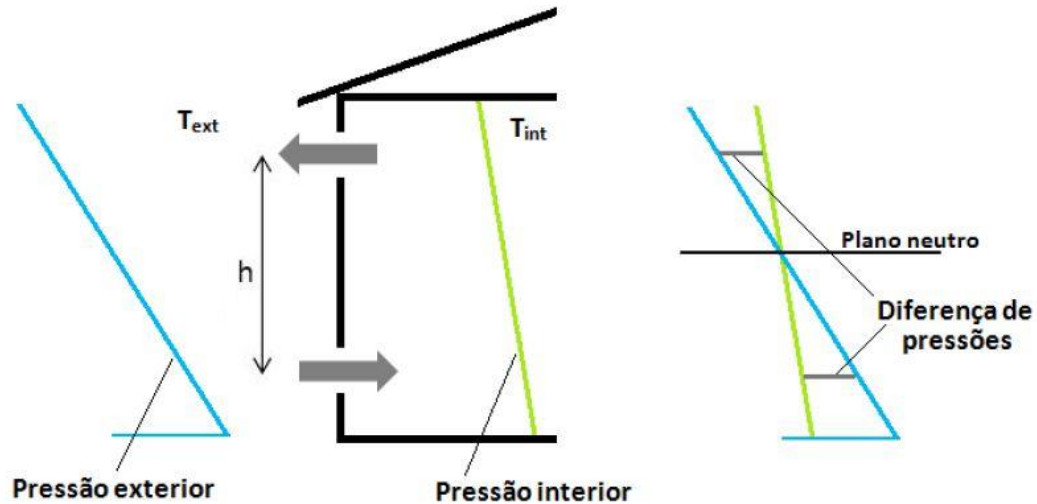


Figura 2.3 – Pressão induzida por ação térmica entre duas aberturas (retirado de [21]).

Quando a temperatura do ar interior é superior à do ar exterior, situação típica durante a estação de aquecimento, o fluxo de ar no interior do edifício apresenta-se ascendente e tem o sentido oposto quando a temperatura interior é menor do que a exterior, como se representa na Figura 2.4.

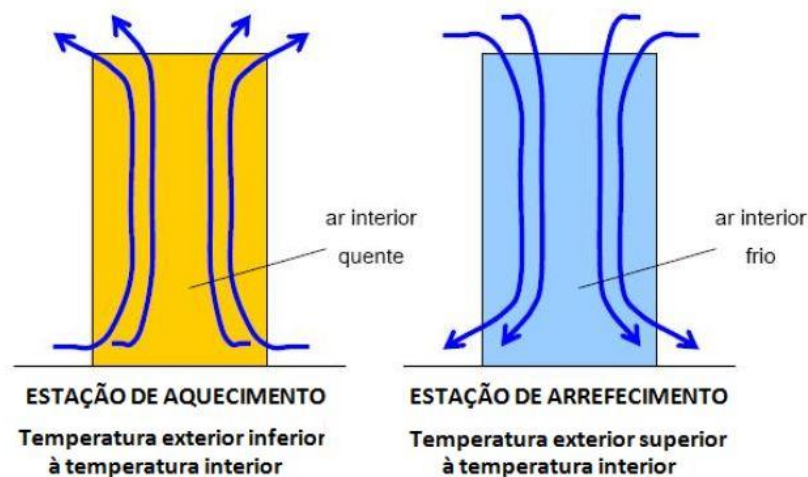


Figura 2.4 – Fluxos de ar devidos à ação térmica (retirado de [21]).

Para uma ventilação eficaz, revela-se necessário que a diferença entre a temperatura média no interior e exterior do edifício seja superior a 8 graus centígrados [26].

Conjugação da ação do vento com o gradiente de temperatura

Num caso real, os dois efeitos anteriormente descritos coexistem, pelo que a distribuição de pressões que atua na envolvente de um edifício é obtida pela soma das pressões geradas por cada um deles [24]. É fundamental assegurar que os efeitos da ação do vento e da ação térmica se complementem, tentando inviabilizar situações de sobreposição ou anulação dos mesmos que conduzam a caudais de ventilação demasiado intensos ou demasiado fracos. O equilíbrio destas ações irá definir como a ventilação natural ocorrerá no interior do edifício.

Tal como referido anteriormente, a ação térmica só promove uma ventilação natural eficaz quando o diferencial entre a temperatura média no interior e exterior do edifício for superior a 8 °C. Nos restantes períodos do ano admite-se que, em regra, seja a ação do vento a garantir a renovação do ar no interior dos edifícios [26].

2.3 Estratégias de Ventilação Natural

Desde o aparecimento dos dispositivos de ventilação mecânica e dos sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC), que o potencial da ventilação natural nos edifícios tem sido negligenciado.

Uma pesquisa sobre sistemas de ventilação utilizados em edifícios modernos de catorze países desenvolvidos, realizada pelo Centro de Infiltração e Ventilação do Ar (AIVC - *Air Infiltration and Ventilation Centre*), mostrou que todos os edifícios comerciais, incluídos na pesquisa, usavam sistemas de ar condicionado, enquanto que os edifícios domésticos utilizavam estratégias de ventilação natural [19].

Podem existir inúmeras razões para ignorar a ventilação natural como opção de sistema de ventilação de um edifício mas, possivelmente, a falta de controlo do sistema seja o fator mais relevante. É portanto essencial selecionar a estratégia de ventilação mais adequada para cada edifício tendo em conta: o volume e altura do espaço; a localização do edifício em relação a fontes de poluição ambiental, como o ruído e o tráfego rodoviário; os ganhos térmicos; e o clima [19].

2.3.1 Ventilação Unilateral

A arquitetura e compartimentação dos espaços interiores dos edifícios torna a ventilação em unilateral a estratégia de ventilação mais comum nas construções existentes. Nesta

estratégia, a renovação do ar interior é efetuada pela admissão e exaustão de ar através de aberturas, grelhas ou janelas, existentes numa única fachada.

A força do vento assume-se como o principal percursor quando as trocas de ar ocorrem por uma única abertura na fachada, principalmente se esta for de pequenas dimensões. No caso de existirem mais aberturas a cotas distintas, a diferença de temperatura, em conjunto com a força do vento, poderá conduzir a um aumento da taxa de ventilação [19].

Apesar da ventilação unilateral ser muito comum, não é possível controlar o fluxo de ar, sendo que o sistema é, apenas, eficiente até uma distância de cerca de $2,5 H$ da abertura, como ilustra a Figura 2.5 [19].

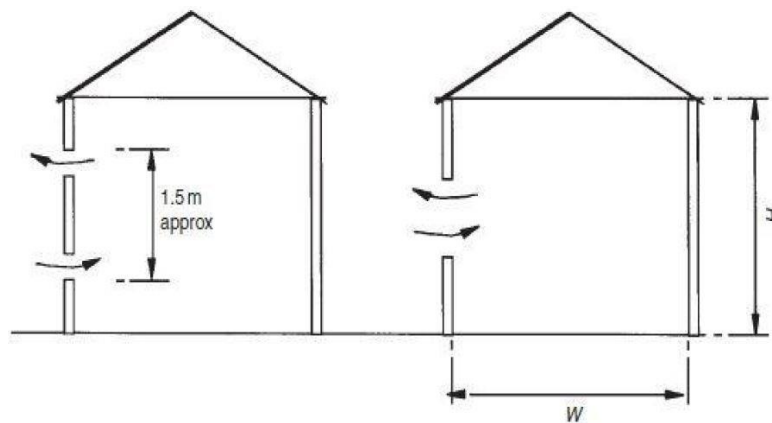


Figura 2.5 – Ventilação unilateral ($W_{\text{máx}} \approx 2,5H$) (retirado de [19]).

De forma a aproveitar a ação do vento, as aberturas de admissão de ar devem ser colocadas na fachada exposta a ventos dominantes do local onde o edifício está inserido, pois é através da diferença de pressão que irão promover a ventilação [22].

2.3.2 Ventilação Cruzada

A ventilação cruzada é uma estratégia onde a admissão é feita a partir de uma ou mais aberturas numa fachada, preferencialmente exposta a ventos dominantes, e a exaustão pela fachada oposta, como mostra a Figura 2.6. Esta estratégia de ventilação recorre, principalmente, ao vento para criar diferentes coeficientes de pressão, por forma a promover a entrada e saída do fluxo de ar [19]. Os tipos de aberturas que são utilizadas para a ventilação cruzada podem ser: pequenas aberturas, como ventiladores e grelha; ou grandes aberturas, como janelas e portas.

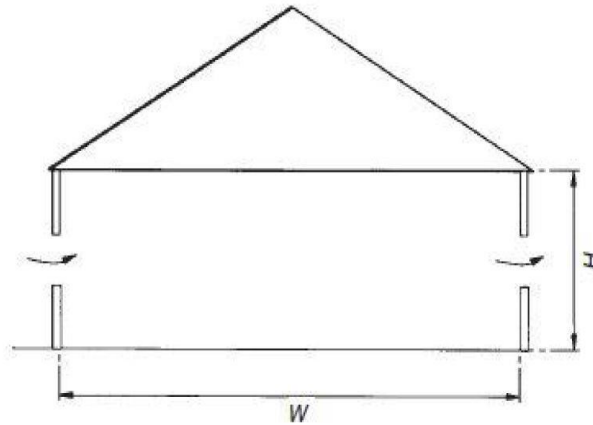


Figura 2.6 – Ventilação cruzada ($W_{\text{máx}} \approx 5H$) (retirado de [19]).

As divisões internas e outras obstruções podem afetar ou perturbar o padrão de fluxo de ar no compartimento e a profundidade de penetração do ar. Assim, torna-se necessário assegurar a permeabilidade de elementos interiores, como portas e janelas, através da existência de folgas inferiores ou grelhas nestes componentes de comunicação entre vários compartimentos [19, 22].

2.3.3 Ventilação por Gradiente Térmico

A ventilação por gradiente térmico é uma estratégia onde se recorre ao uso de condutas verticais, sendo que o princípio se baseia na diferença da temperatura entre o interior e exterior do compartimento e suas respectivas densidades [19].

Este sistema tanto pode ser influenciado pelo vento, como pela diferença de temperatura. No caso de, apenas, existir abertura no teto, como o ar quente é menos denso e se acumula nas camadas superiores, sairá mais rápido para o exterior, devido à diferença de pressões criada pela diferença de temperatura. Nesta situação, a maior influência é atribuída à diferença de temperatura. Contudo, se existir uma abertura na fachada e outra no teto irá estabelecer-se um sistema onde o ar mais frio entrar pela abertura na fachada, forçando o ar mais quente a sair pela abertura no teto, como ilustrado na Figura 2.7. Neste caso, pode existir a ação mecânica do vento, bem como a influência do diferencial de pressões provocado pela temperatura.

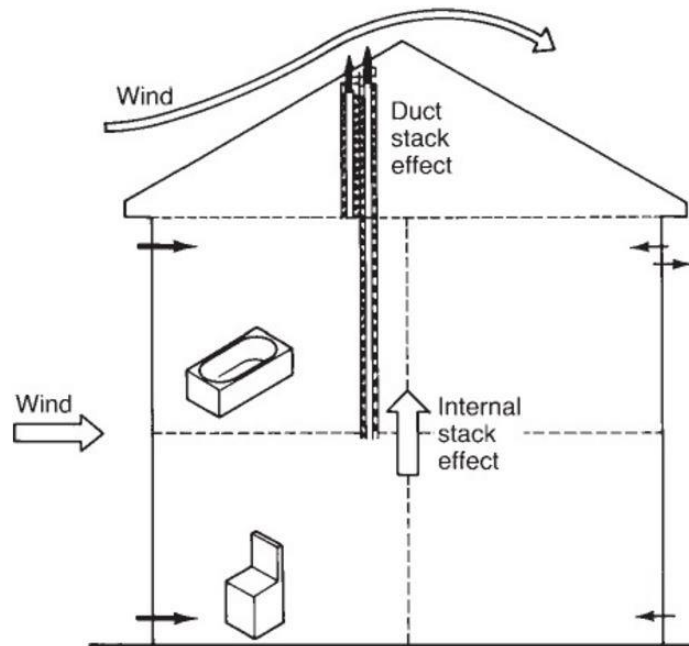


Figura 2.7 – Ventilação por gradiente térmico (retirado de [19]).

De forma a tornar o sistema eficiente e para que não ocorram inversões no sentido do fluxo de ar, é necessário que a conduta de exaustão obedeça a determinadas condições, tais como: que se desenvolva na vertical; que seja mais elevada que o ponto mais alto da cobertura; que tenha bom isolamento térmico e forte inércia térmica, mantendo as temperaturas elevadas no interior; e que a extremidade da conduta tenha características que favoreçam depressões, permitindo o movimento ascendente do ar [26].

2.4 Taxa de Ventilação

A taxa de ventilação representa o valor necessário de ar novo a ventilar para assegurar os limites satisfatórios de QAI, de modo a manter o ambiente interior aceitável para os ocupantes, dependendo das dimensões do espaço, do número de pessoas no interior e da sua atividade, e da produção de substâncias contaminantes no interior [19, 22, 27]. Os seus valores estão limitados, superiormente, pelos critérios de conservação de energia e, inferiormente, pelo método prescritivo ou pelo método analítico [20].

O método prescritivo define um caudal de ar novo necessário de forma a garantir a diluição da carga poluente devido (1) aos ocupantes e em função do tipo de atividade física, (2) ao próprio edifício e em função do tipo de materiais usados na construção. Este método

pode ser expresso por pessoa, por unidade de área ou unidade de volume, originando neste ultimo caso o parâmetro de renovações por hora ($R_{ph} [h^{-1}]$).

O método analítico traduz a aplicação da evolução temporal da concentração de dióxido de carbono previsível no espaço, de acordo com o perfil de ocupação e com o objetivo de cumprir o limiar de proteção do CO_2 durante o período de ocupação.

Além destes critérios existem outros, como a quantidade de caudal novo necessária que um aparelho de combustão deve admitir para o seu normal funcionamento, determinado de acordo com a potência do aparelho ou através da colocação de um dispositivo autorregulável [26].

A taxa de ventilação apresenta valores variáveis ao longo dos anos uma vez que a sua definição requer a satisfação de requisitos de saúde, que são revistos regularmente, e de conforto, que variam com a pessoa e com o local. Neste sentido, existe uma falta de consenso em relação ao valor ótimo da taxa de ventilação de ar novo por pessoa, como ilustra a Figura 2.8 [19, 28].

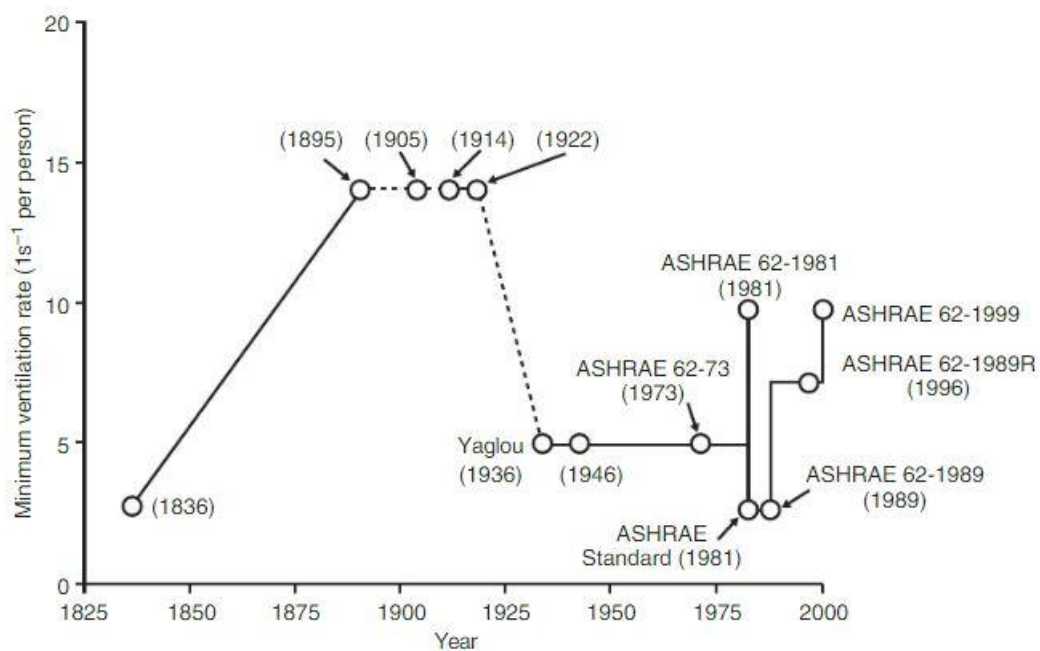


Figura 2.8 – Evolução das taxas de ventilação mínimas nos EUA (retirado de [19]).

O número de renovações horárias que é objeto de estudo do presente trabalho está relacionado com o caudal volúmico de ventilação pela equação:

$$R_{ph} = \frac{Q}{V} \quad (1.3)$$

Onde:

R_{ph} : número de renovações horárias [h^{-1}];

Q : caudal volúmico de ventilação [$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$];

V : volume efetivo do espaço [m^3].

A renovação horária pode ser entendida como o número de vezes que o ar de um espaço é renovado em cada hora. No entanto, dizer que a renovação horária é igual a 1 h^{-1} significa que o volume total de ar exterior, que passa pelo espaço fechado numa hora, é igual ao volume desse espaço e não, necessariamente, que todo o ar interior seja completamente renovado.

2.5 Quadro Legal em Portugal

As primeiras referências à ventilação surgiram no Decreto-Lei 38 382 de 7 de agosto de 1951, que se integra no Regulamento Geral das Edificações Urbanas (RGEU) [29] e nas Recomendações Técnicas para Habitação Social (RTHS) [30], de que faz parte o despacho 41/MES/85 de 14 de fevereiro de 1985. Estes documentos contemplavam indicações importantes mas insuficientes no ponto de vista dos valores quantitativos de caudais a aplicar.

A 6 de fevereiro de 1990 o Decreto-Lei nº 40/90 aprovou o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE). Este regulamento foi a primeira ferramenta legal, em Portugal, a obrigar os projetos de novos edifícios e de grandes remodelações a cumprir requisitos que garantiam a satisfação das condições de conforto térmico durante todo o ano, sem dispêndio excessivo de energia. O outro objetivo apresentado neste documento visava a preservação dos elementos construtivos contra efeitos patológicos derivados de condensações. A sua última atualização foi aprovada pelo Decreto-Lei nº 80/2006 a 4 de abril de 2006 [31].

Em 1995, João Viegas divulga o documento técnico “Ventilação natural de edifícios de habitação” publicado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) [32], onde se recomendam medidas a ser adotadas na ventilação dos compartimentos de edifícios de habitação. Este documento serviu de base para a conceção dos sistemas de ventilação natural até 2001, ano do lançamento da norma NP 1037.

Poucos anos depois, a 7 de maio de 1998, o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE) foi aprovado pelo Decreto-Lei nº 118/98. É possível compreender que este documento oficial define as regras para o dimensionamento e instalação dos sistemas energéticos de climatização num edifício, introduz medidas de racionalização com o intuito de evitar o seu sobredimensionamento e, desta forma, contribuir para a sua eficiência energética. Para além disto, este regulamento obriga a realização de auditorias energéticas periódicas aos edifícios de serviços, impondo também requisitos de caudais mínimos do ar interior por tipo de atividade e concentrações máximas dos principais poluentes. O RSECE teve a sua última atualização a 4 de abril de 2006, através do Decreto-Lei n.º 79/2006 [33].

Mais tarde, em 2001 foi criada a primeira norma portuguesa sobre ventilação, NP 1037-1 “Ventilação e evacuação dos produtos da combustão dos locais com aparelhos a gás. Parte 1: Edifícios de habitação. Ventilação natural” [26]. Atualizada em 2015 tem por objetivo definir as regras a que devem obedecer os sistemas de ventilação natural dos edifícios de habitação e quantificar as exigências de ventilação através de caudais tipo, estabelecidos com base em critérios de QAI quando os compartimentos principais e de serviço se encontram em utilização. Para os compartimentos principais é recomendado um caudal tipo mínimo de uma renovação por hora e para os compartimentos de serviço é recomendado o caudal tipo mínimo de quatro renovações por hora (atendendo à forte influência das condições ambientais na ventilação natural este caudal tipo deve ser entendido à luz da respetiva norma, como um elemento de dimensionamento e não como um caudal a assegurar fisicamente).

A 20 de agosto foi realizada a transposição da Diretiva 2010/31/EU para o direito nacional através da publicação do Decreto-Lei nº 118/2013 [34]. Este diploma contempla agora toda a legislação referente ao desempenho energético dos edifícios, de que faz parte a componente da ventilação. Atualmente encontra-se aprovado o Sistema de Certificação Energética de Edifícios (SCE), o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS), revogando assim grande parte dos Decretos-Lei N.ºs 78, 79 e 80/2006. Neste documento foram eliminadas as auditorias impostas pelo RSECE, atribuindo maior relevância à manutenção dos valores mínimos de caudal de ar novo e dos limites de proteção para os poluentes do ar interior.

Apresenta-se no Quadro 2.4 os limites de caudal mínimo de ar novo em função da carga poluente devido à ocupação, atualmente legislados em Portugal.

Quadro 2.4 – Caudal de ar novo mínimo determinado em função da carga poluente devida à ocupação (adaptado de [20])

Tipo de atividade	Exemplos de tipo de espaço	Caudal de ar novo [m ³ /(hora·pessoa)]
Sono	Quartos, dormitórios e similares.	16
Descanso	Salas de repouso, salas de espera, salas de conferências, auditórios e similares, bibliotecas.	20
Sedentária	Escritórios, gabinetes, secretarias, salas de aula, cinemas, salas de espetáculo, salas de refeições, lojas e similares, museus e galerias, salas de convívio, salas de atividade de estabelecimentos de geriatria e similares.	24
	Salas de jardim-de-infância e pré-escolar e salas de Creche.	28
Moderada	Laboratórios, ateliers, salas de desenho e trabalhos oficinais, cafés, bares, salas de jogos e similares.	35
Ligeiramente alta	Pistas de dança, salas em ginásios, salas de ballet e similares.	49
Alta	Salas de musculação, salas em ginásios e pavilhões Desportivos e similares.	98

É de salientar que as autoridades responsáveis pela implementação da nova legislação são: a Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG) – sector de Energia e a Agência Portuguesa do Ambiente (APA) – sector da QAI. A gestão está a cargo da Agência para a Energia (ADENE) [34].

2.6 População Universitária em Portugal

O Ensino Superior português tem sofrido, ao longo das últimas décadas, profundas alterações, traduzidas no aumento do número de Instituições de Ensino Superior e no aumento, em número e diversidade, da criação de novos programas e ciclos de estudo. Destaca-se ainda a implementação do processo de Bolonha, a mudança do perfil socioeconómico dos estudantes, a sua situação perante o mercado do trabalho e as tendências gerais, como a globalização e a democratização do acesso ao Ensino Superior [35].

Os fatores mencionados contribuíram para um aumento significativo do número de alunos que integram os quadros do Ensino Superior português, visível na Figura 2.9. Apesar deste crescimento verifica-se na Figura 2.10 que nos anos de 2013 e 2014, anos de forte recessão

económica em Portugal, o número de vagas de acesso ao Ensino Superior ultrapassou o número de candidatos.

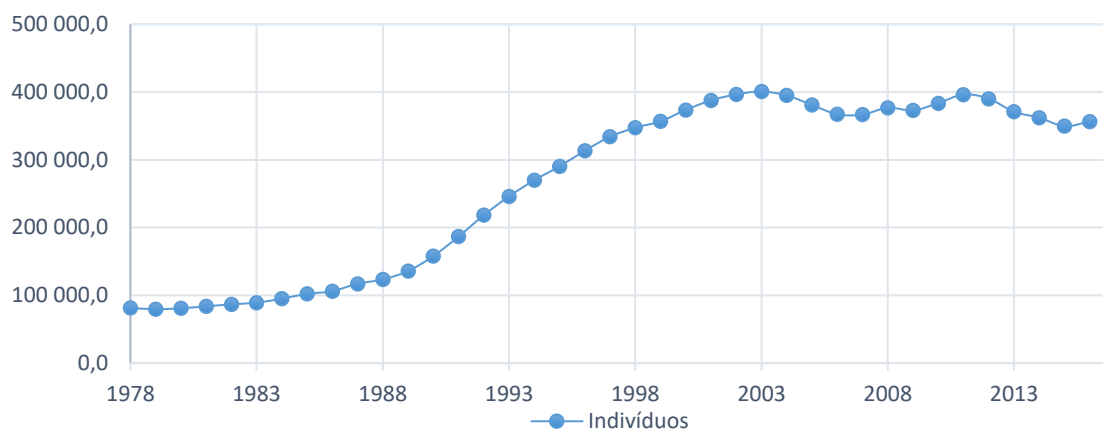


Figura 2.9 – Alunos matriculados no ensino superior (dados de [36]).

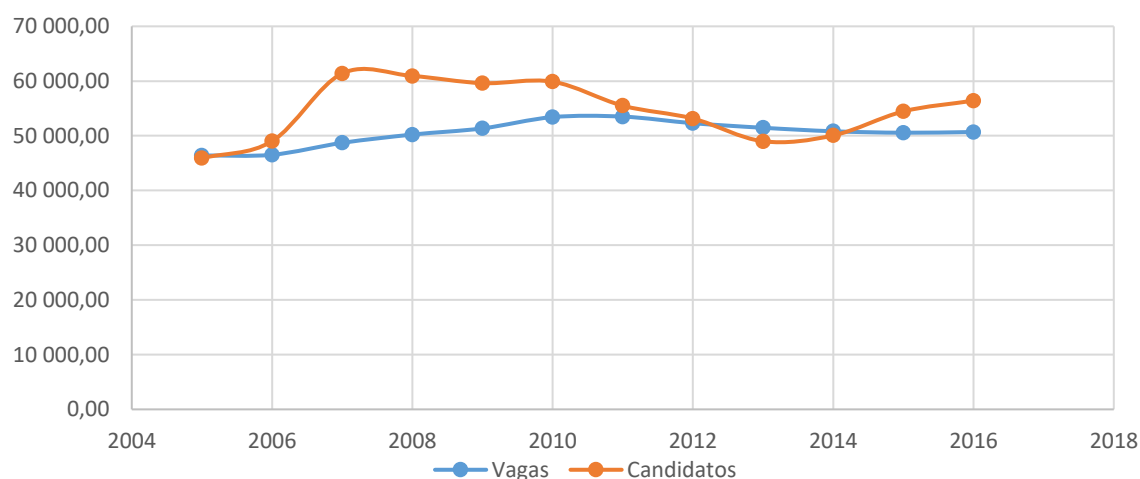


Figura 2.10 – Oferta educativa de Ensino Superior (adaptado de [17]).

Segundo a Direção-Geral do Ensino Superior (DGES) no ano letivo de 2016/2017 as 33 instituições de Ensino Superior proporcionaram 539 ciclos de estudos com 50.688 vagas, aos quais se candidataram 56.417 estudantes com a idade média de 19 anos. Na Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, objeto de estudo deste trabalho, matricularam-se, no mesmo ano letivo, 1165 novos estudantes [17].

Capítulo 3

Método do Gás Traçador

Este capítulo contém os diferentes aspetos relacionados com o método do gás traçador e as suas técnicas de utilização. Na primeira secção define-se o método do gás traçador e apresenta-se a equação que lhe serve de base, bem como as suas condições de aplicação. Na segunda secção apresenta-se as características de um gás traçador analisando em maior detalhe o CO_2 por ser o utilizado no presente estudo. Na terceira secção são descritas e explicadas quatro técnicas de medição do gás traçador. Na quarta secção são avaliadas as incertezas de medição enfatizando a técnica do decaimento. Por último, na quinta secção é exposto o método de determinação da taxa de produção metabólica de CO_2 .

3.1 Fundamentos Teóricos do Método do Gás Traçador

O método do gás traçador consiste no registo da evolução da concentração de um gás ao longo do tempo dentro do compartimento a ser testado. Para realizar este registo é necessário introduzir uma determinada quantidade de gás, que deverá ser pouco comum na atmosfera, dentro do compartimento e registar a sua concentração ao longo do tempo, recorrendo a equipamentos e técnicas específicas.

Dependendo do tipo de controlo e método de injeção, torna-se possível realizar a seguinte classificação [22]:

- Técnica de decaimento;
- Técnica de emissão constante;
- Técnica da emissão constante com recolha passiva (PFT's – volatile per fluoro tracers);
- Técnica da concentração constante.

A base teórica para todas as técnicas é a lei da conservação da massa do ar e do gás traçador, definida pela equação de balanço de massa, sendo necessário por isso admitir-se as seguintes condições:

- a concentração do gás é homogénea (concentração uniforme);
- assume-se uma perfeita e imediata mistura do gás traçador com o ar;

- a pressão atmosférica é constante e homogénea;
- a emissão do gás traçador não altera a densidade do ar;
- a temperatura e densidade do ar não variam com o tempo;
- a temperatura e densidade do ar são uniformes em todo o edifício e no exterior.

Admitindo ainda que o vento é estacionário e as temperaturas interior e exterior do ar são constantes e uniformes, o que implica que as respetivas densidades não variem no tempo, o balanço da massa pode ser expresso, em termos de caudais volúmicos, pela seguinte equação diferencial, [19]:

$$V \frac{dc}{dt} = G + Q(c_{ext} - c) \quad (3.1)$$

Onde:

V: volume efetivo do espaço [m³];

Q: caudal de ventilação [m³/s];

c_{ext} : concentração volúmica do gás traçador no exterior (m³ de gás por m³ de ar);

c : concentração volúmica do gás traçador no interior no instante t (m³ de gás por m³ de ar);

t : tempo [s];

G: caudal volúmico de emissão de gás traçador no interior [m³/s].

A equação (3.1) é a equação base para a aplicação do método do gás traçador. Como as diferentes técnicas acima referidas implicam diferentes procedimentos relativos às condições e ao modo como é medida a concentração do gás traçador ao longo do tempo, são necessárias diferentes abordagens na resolução da equação de balanço de massa.

3.2 Características de um Gás Traçador

O gás traçador deve reunir determinadas características para que a determinação da sua renovação possa ser efetuada com sucesso, nomeadamente deverá [22, 24]:

- ser facilmente detetável, preferencialmente a baixas concentrações;
- possuir baixas concentrações no ar exterior e interior;
- ser não inflamável e não explosivo;
- possuir peso molecular aproximadamente idêntico ao do ar (peso molecular do ar igual a 29 g/mol) ou diluído no ar para assegurar uma boa mistura;
- não ser produzido nem adsorvido na zona em estudo, nem sofrer decomposição ou reagir com o ar ou componentes do edifício;
- não ser dispendioso;
- ser não tóxico e sem risco para a saúde dentro dos limites usados;
- ser inodoro, insípido e incolor;
- ser ambientalmente inerte.

Para além destas características o gás traçador deve constituir uma mistura homogénea com o ar num intervalo muito curto de tempo, depois de libertado. Esta mistura resulta dos seguintes fenómenos [22, 24]:

- movimento do próprio gás, resultante da diferença de peso molecular entre o gás traçador e o ar;
- difusão molecular do gás traçador;
- transporte do gás traçador pelo ar, devido a fenómenos de convecção.

Nenhum gás satisfaz globalmente todos os requisitos acima mencionados, por isso a seleção do gás a utilizar acontece em função de vários condicionalismos, nomeadamente da sua facilidade de aquisição.

Apresenta-se no Quadro 3.1 uma análise comparativa dos gases mais frequentemente usados.

Quadro 3.1 – Qualidade de alguns gases mais frequentemente utilizados (retirado de [24]).

Nome	Características do gás							
	Não inflamável nem explosivo	Não tóxico	Densidade próxima do ar	Não é adsorvido nem reage	Fácil de analisar	Baixa concentração exterior	Sem fontes no espaço interior	Não dispendioso
Dióxido de carbono	++	-	+	-	++	--	--	++
Óxido nitroso ou Protóxido de azoto	(a)	-	+	-	+	+	+	++
Hexafluoreto de enxofre	(b)	+	-	+	++	++	++	+
Perfluorocarbonos	++	++	--	++	+	++	++	++
Notas: Nível de qualidade: ++ Muito bom; + Bom; - Não tão bom; -- Muito mau; (a): Não combustível, mas é um bom oxidante a altas concentrações e temperatura; (b): Não é combustível, mas decompõe-se em chama produzindo químicos tóxicos.								

Dióxido de Carbono como Gás Traçador

O dióxido de carbono foi utilizado neste estudo como gás traçador. Este caracteriza-se por ser um produto resultante do metabolismo dos utentes sendo, principalmente, por essa razão que é bastante usado como gás traçador na avaliação da ventilação de espaços onde o período de permanência dos ocupantes é prolongado, nomeadamente em escritórios, habitações e salas de aula. Apesar de se encontrar presente na atmosfera, critério utilizado para definir um gás traçador, possui diversos aspetos positivos que validam a sua utilização. Verifica-se em relação ao CO₂ que [22, 24]:

- não é dispendioso;
- não é inflamável nem explosivo;
- tem uma massa molar ($M=44\text{g.mol}^{-1}$) relativamente próxima da massa molar média do ar ($M=29\text{ g.mol}^{-1}$), sendo a sua densidade relativa de 1,53;
- é fácil de analisar, a concentração mínima detetável é de 3 ppm, sendo no entanto aconselhável usar uma concentração mínima 100 vezes superior, com o objetivo de garantir que exista uma proporcionalidade direta entre os valores lidos no aparelho e a concentração;

- apresenta uma toxicidade baixa, não constituindo risco de saúde para os ocupantes do espaço, desde que sejam assegurados os limites recomendados. O valor limite de exposição permitido está definido no RECS [20] como limiar de proteção de CO₂ por 1250ppm ou 2250 mg/m³. Por sua vez, a Associação Americana Para Testes e Materiais (ASTM – *American Society for Testing and Materials*) define como limite máximo de segurança para exposição de CO₂, 5000ppm [27].

Podem ainda identificar-se algumas características negativas inerentes à utilização do CO₂ como gás traçador, tais como [22, 24]:

- pode ser adsorvido pelos materiais de revestimento do compartimento em estudo, como placas de gesso cartonado ou placas de fibras de madeira (MDF), ainda que em baixa percentagem;
- é produzido pelos ocupantes da zona em estudo.

3.3 Técnicas de Medição Usadas no Método do Gás Traçador

O método do gás traçador é amplamente utilizado para determinar taxas de ventilação e caudais de ar ventilados devido à sua fácil aplicação em variados casos. É importante salientar que edifícios com diferentes tipos de utilização requerem cuidados específicos, que são considerados com o recurso a técnicas de medição e análise distintas.

A título de exemplo, numa situação comum de um quarto de dormir, onde o gás traçador é o CO₂, podem ser utilizadas várias técnicas de medição. A entrada do ocupante no quarto conduz a um aumento do nível de concentração de CO₂, sendo que até ser atingida uma concentração constante deste gás, é utilizada a técnica de emissão constante. Uma vez alcançada a concentração constante, e enquanto o ocupante se encontra dentro do quarto, a técnica mais indicada é a técnica do estado estacionário. Por fim, quando o ocupante abandona o quarto a concentração de CO₂ começa a diminuir e neste caso é utilizada a técnica do decaimento.

De forma a que se compreenda cada técnica mencionada, em seguida são descritas e explicadas quatro técnicas de medição do método do gás traçador.

3.3.1 Técnica do Decaimento

A técnica do decaimento foi a utilizada neste projeto para a determinação das taxas de renovação horária. Nesta técnica uma determinada quantidade de gás traçador é libertada no espaço interior de modo a obter-se uma concentração inicial uniforme. A partir desse instante, o decaimento da concentração do gás traçador é medido ao longo do tempo e a taxa de renovação horária é determinada com base nos valores registados.

A determinação da taxa de renovação horária é obtida através da equação do balanço de massa (Equação 3.1) e tentando respeitar todas as suas condições, anteriormente definidas. É de salientar que, as condições de homogeneidade e de mistura imediata são normalmente controladas através do uso de pequenos ventiladores ou dadas como válidas para compartimentos com pé direito inferior a 2,5 metros. A hipótese da constante temperatura e densidade do ar ao longo do tempo é satisfeita quando a variação relativa da temperatura é menor que a variação relativa da concentração. Por fim, a condição da uniformidade da temperatura e da densidade do ar pode ser satisfeita se: as temperaturas das várias zonas não diferirem significativamente, o volume do gás injetado for medido à temperatura do ar no edifício e o edifício não for aquecido ou arrefecido [24, 27].

Para uma zona com regime permanente, em que não há produção nem absorção do gás traçador, a equação de balanço de massa é traduzida em caudais volúmicos pela seguinte expressão matemática:

$$c(t) = c_{ext} - c_{ext} \cdot e^{\left(\frac{Q}{V}t\right)} + c_0 \cdot e^{\left(\frac{Q}{V}t\right)} \quad (3.2)$$

Onde:

c_0 : concentração volúmica do gás traçador no interior no instante $t=0s$.

A equação (3.2) pode ser reescrita por:

$$c(t) - c_{ext} = (c_0 - c_{ext}) \cdot c_0 \cdot e^{\left(-\frac{Q}{V}t\right)} \quad (3.3)$$

Reorganizando a equação obtém-se:

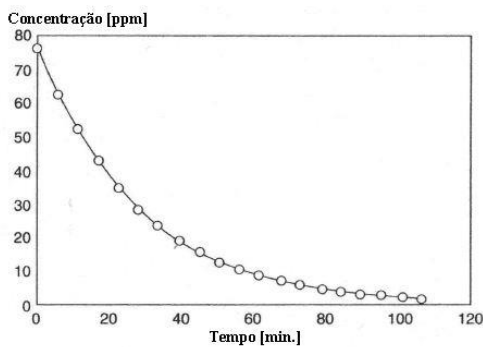
$$R_{ph} = \frac{Q}{V} = - \frac{\ln \left(\frac{c(t) - c_{ext}}{c_0 - c_{ext}} \right)}{t} \quad (3.4)$$

Com:

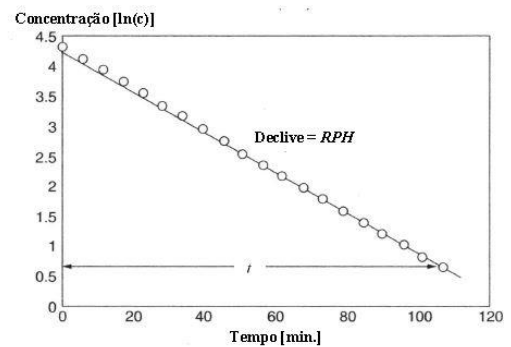
Q : caudal de ventilação [m³/h];

t : tempo [h].

Quando se regista graficamente o logaritmo natural da diferença entre a concentração do gás traçador e a sua concentração exterior em ordem ao tempo, obtém-se uma reta [21]. Consequentemente, através de uma regressão linear, torna-se possível determinar o módulo do declive da reta, $\frac{Q}{V}$, que corresponde à renovação horária no intervalo de tempo considerado para as medições. Figura 3.1 ilustra o processo descrito.



a)



b)

Figura 3.1 – Técnica do decaimento, a) decaimento da concentração do gás traçador, b) gráfico do logaritmo da concentração (retirado de [19]).

Se, eventualmente, na Figura 3.1b) existir uma zona inicial não linear, esta deve ser retirada do cálculo do declive, pois revela que as condições estacionárias para a realização do ensaio não foram atingidas.

A determinação do módulo do declive pode ser obtida por dois métodos:

- pelo cálculo da média dos módulos dos declives entre medições consecutivas durante o intervalo de tempo de medição, aplicando a expressão:

$$\frac{\sum_{i=0}^n \left[\frac{\ln(c(t_i) - c_{ext}) - \ln(c(t_{i+1}) - c_{ext})}{t_{i+1} - t_i} \right]}{n - 1} \quad (3.5)$$

em que n corresponde ao número de medições;

- a partir da equação da reta de regressão linear, resultante do método dos mínimos quadrados aplicado aos valores experimentais obtidos.

A normalização existente para a realização deste ensaio aconselha alguns procedimentos [24, 27]:

- antes de injetar o gás, verificar a concentração existente do gás a medir, de modo a corrigir as medições, caso necessário;
- uso de um ventilador rotativo (30 W) em cada zona, a rodar a baixa velocidade, posicionado a jusante da sonda de emissão de gás e direcionado para o centro do compartimento. Nos compartimentos de maior dimensão usar dois ventiladores. A Figura 3.2 ilustra um esquema de posicionamento de ventiladores;
- a emissão de gás pode ser colocada no ventilador rotativo devidamente fixada;
- a recolha do gás pode ser localizada a metade da altura da zona e afastada da emissão e de janelas ou portas;
- após a emissão do gás e com o ventilador a funcionar, esperar 2 a 3 minutos até se iniciar o ensaio (tempo estimado para se obter uma concentração uniforme);

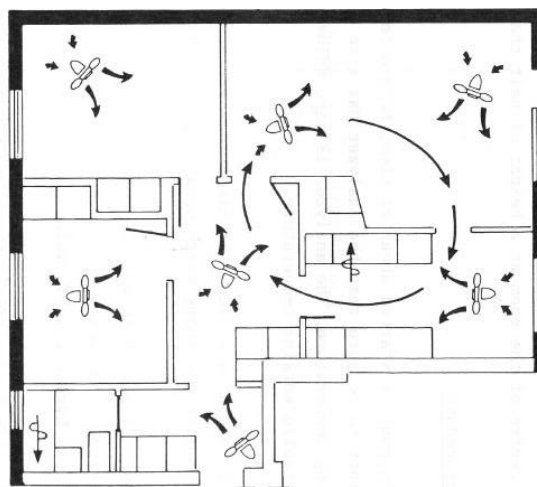


Figura 3.2 – Esquema ilustrativo de posicionamento de ventiladores (retirado de [27]).

O tempo de ensaio deverá ser superior a 1 hora e aproximadamente igual à constante de tempo nominal, τ_n , com intervalos entre medições inferior a dois minutos [24, 27].

$$\tau_n = \frac{1}{R_{ph}} \quad (3.6)$$

3.3.2 Técnica da Emissão Constante

O gás traçador é introduzido no compartimento em estudo a uma taxa conhecida e constante, sendo medida e registada a variação da concentração ao longo do tempo. Este registo é interrompido quando se atinge uma concentração de gás traçador constante. A curva de crescimento obtida é tanto mais acentuada quanto maior for a taxa de produção do gás traçador por unidade de volume do espaço e quanto menor for a taxa de renovação, R_{ph} . A Figura 3.3 ilustra esta relação.

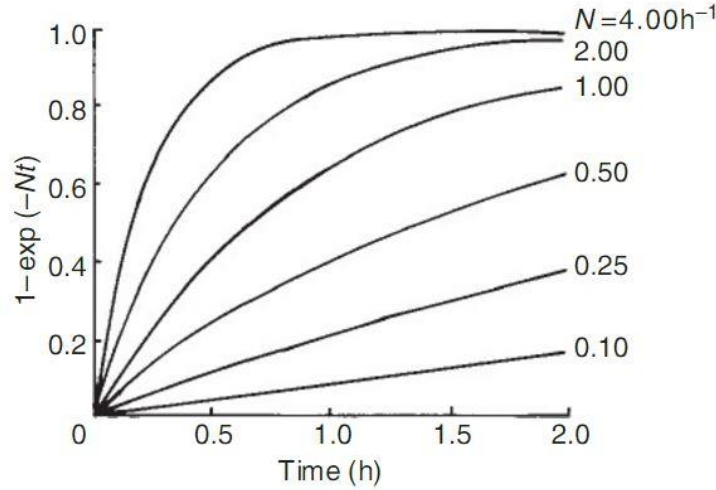


Figura 3.3 – Variação da função exponencial $[1 - e^{(-\frac{Q}{V}t)}]$ com o tempo para diferentes taxas de renovação do ar (retirado de [19]).

Utilizando a equação (3.1) e assumindo as mesmas hipóteses anteriormente apresentadas para a técnica do declive, a solução da equação diferencial correspondente à emissão constante do gás traçador é dada pela seguinte expressão matemática:

$$c = c_{ext} + \frac{G}{Q} + \left(c_0 - c_{ext} - \frac{G}{Q} \right) \cdot e^{(-\frac{Q}{V}t)} \quad (3.7)$$

Assumindo uma taxa de infiltração constante, Q , e uma concentração de gás traçador no início do ensaio igual à concentração exterior, a equação (3.7) assume a seguinte forma:

$$c = c_{ext} + \frac{G}{Q} \cdot (1 - e^{-R_{ph} \cdot t}) \quad (3.8)$$

Obtida uma concentração de equilíbrio, o caudal de ar exterior é dado por:

$$Q = \frac{\bar{G}}{c - c_{ext}} \quad (3.9)$$

Onde:

\bar{G} : taxa de injeção constante do gás traçador [m^3/s].

3.3.3 Técnica da Emissão Constante com Recolha Passiva – PFT

A técnica do gás traçador com recolha passiva é uma variante da técnica da emissão constante e consiste na emissão contínua e passiva do gás traçador, por exemplo Perfluorobenzeno (C_6F_6 - PB) ou Perfluorometilbenzeno (C_7F_8 - PMB), através de cápsulas emissoras. O gás emitido é posteriormente recolhido pelas capsulas recetoras. As Figura 3.4 ilustram as cápsulas emissoras e recetoras, respetivamente.



Figura 3.4 – Cápsula emissora e cápsula recetora PFT, respetivamente (retirado de [3]).

O gás contido nas cápsulas emissoras encontra-se na estado líquido e é disperso no ar ambiente, após evaporação, através da passagem por uma membrana ou através da difusão

por um tubo capilar. As cápsulas emissoras e recetoras depois de utilizadas devem ser manuseadas e armazenadas em separado para evitar o risco de contaminação.

Este método é pouco dispendioso e não evasivo, podendo ser realizado por técnicos pouco experientes, sendo que com a utilização de mais do que um tipo de gás torna-se possível analisar a interação da ventilação entre zonas distintas de um edifício.

3.3.4 Técnica do Estado Estacionário

Conceptualmente, esta é a técnica mais simples, mas a sua aplicação requer equipamento específico que seja capaz de controlar a taxa de injeção de gás traçador, G , para manter um determinado nível de concentração. O método depende de manter um nível constante de concentração de gás traçador no espaço ao longo do período de teste. Esta exigência simplifica a equação (3.1) para:

$$G + Q \cdot (c_{ext} - \bar{c}) = 0 \quad (3.10)$$

i.e.:

$$Q = \frac{G}{\bar{c} - c_{ext}} \quad (3.11)$$

Onde:

\bar{c} : concentração média de gás traçador [ppm]

Apesar das semelhanças entre as equações (3.9) e (3.11), estas diferem no facto de na segunda equação, a concentração constante ser mantida através da variação da taxa de injeção de gás, enquanto que na primeira é usada uma taxa de injeção constante de gás traçador. Na equação (3.11), o caudal de ar exterior é diretamente proporcional à taxa de injeção de gás requerida para manter uma dada concentração, \bar{c} .

Uma das principais vantagens deste método é que pode ser totalmente automatizado, abrindo a possibilidade de deixar o aparelho sem vigilância no edifício em estudo para recolher dados, que podem ser armazenados no computador ou enviados diretamente para o computador do investigador.

3.4 Avaliação dos Erros de Medição

A complexidade dos processos de ventilação natural e a sua dependência de fatores não controláveis, como os efeitos meteorológicos, torna o seu estudo e medição exata inexequíveis. Neste sentido, torna-se necessário recorrer a representações simplificadas da realidade para que a medição e tratamento dos dados sejam possíveis. Contudo, estas simplificações adicionam imprecisão e erros aos resultados obtidos.

Na presente dissertação é utilizada a técnica do decaimento onde são utilizadas as simplificações do método do gás traçador e das características do gás utilizado. No caso da determinação da renovação horária relativa à ventilação natural é assumido que existe uma homogeneização completa em toda a zona ventilada. Esta hipótese pode considerar-se como válida em compartimentos com ventilação natural e pé-direito até 2,5m, em virtude da homogeneização do ar interior ser, na realidade, quase completa. Contudo, esta não se verifica no caso de compartimentos com alturas superiores, devido à estratificação da temperatura do ar e consequentemente do gás traçador.

Uma das principais causas de erro na técnica do decaimento prende-se com a determinação do volume efetivo do espaço ventilado, utilizado na equação 3.4 para calcular os caudais de renovação de ar. Para determinar esse volume revela-se necessário considerar, também, o volume de todos os objetos dentro da zona, como por exemplo mobílias e equipamentos. De forma a mitigar este erro, quando possível, podem abrir-se os armários ou arrumos, assim esses volumes, inicialmente encerrados, serão ventilados.

Outras fontes de erro são a não uniformidade da concentração inicial e a deriva do analisador (variação da exatidão das medições com o tempo).

3.5 Determinação da Taxa de Produção Metabólica de Dióxido de Carbono

O consumo de oxigénio e a produção de dióxido de carbono no processo respiratório ocorrem a uma taxa que está dependente do tamanho da pessoa e da intensidade da sua atividade física. Esta estimativa pode ser obtida através da seguinte expressão:

$$G_{CO_2} = (0,0094 \cdot A_{Du} \cdot M) \cdot N \quad (3.12)$$

Onde:

G_{CO_2} : valor da taxa total de geração de CO_2 [m^3/h];

A_{Du} : Área de DuBois da superfície corporal [m^2]

M : taxa de metabolismo dos ocupantes [met] (1 met= 58,15 W/ m^2);

N : número de ocupantes do espaço;

A taxa de metabolismo dos ocupantes é obtida através do Quadro 3.2, em função da atividade física desenvolvida pelo ocupante no espaço.

Quadro 3.2 – Taxa de metabolismo em função do tipo de atividade física (retirado de [20]).

Tipo de atividade	Taxa de metabolismo dos ocupantes – M [met]
Sono	0,8
Descanso	1,0
Sedentária	1,2
Moderada	1,75 (1,4 a 2,0)
Ligeiramente Alta	2,5 (2,0 a 3,0)
Alta	5,0 (3,0 a 9,0)

A área de Dubois da superfície corporal é dada pela seguinte equação:

$$A_{Du} = 0,202 \cdot W_b^{0,425} \cdot H_b^{0,725} \quad (3.13)$$

Onde:

W_b : massa corporal típica [kg];

H_b : altura típica do corpo humano [m].

Para efeitos da determinação da área de Dubois e na ausência de informação mais detalhada, poderão ser adotados os valores indicados no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Área de Dubois em função da idade dos ocupantes e parcela a adicionar à atividade metabólica função da faixa etária (retirado de [20]).

Idade dos ocupantes	A_{Du} [m ²]	ΔM [met]
3 anos	0,65	0,19
até 6 anos	0,80	0,14
até 9 anos	1,10	0,09
até 11 anos	1,30	0,07
até 14 anos	1,60	0,05
até 18 anos e adultos	1,80	0,00

A taxa de produção metabólica de CO₂ revela-se importante quando o gás traçador utilizado é o CO₂ e a fonte emissora são os ocupantes do compartimento a estudar. Esta aplica-se quando se utiliza a técnica da emissão constante e a técnica do estado estacionário, uma vez que é fundamental conhecer a taxa de emissão de CO₂ nos compartimentos.

Capítulo 4

Metodologia de Trabalho

No primeiro tópico deste capítulo caracteriza-se a universidade e os edifícios selecionados para o estudo. Seguidamente, são caracterizadas, também, as salas escolhidas bem como os critérios da sua seleção. Por último, descreve-se o método de medição incluindo a caracterização dos aparelhos de medição utilizados.

4.1 Caracterização da Universidade e dos Edifícios Selecionados

O objetivo principal deste trabalho passa por estimar a taxa de renovação horária de oito salas de aula de dois edifícios da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa (FCT/UNL), localizada na Caparica, concelho de Almada. A Figura 4.1 representa a localização da FCT/UNL.

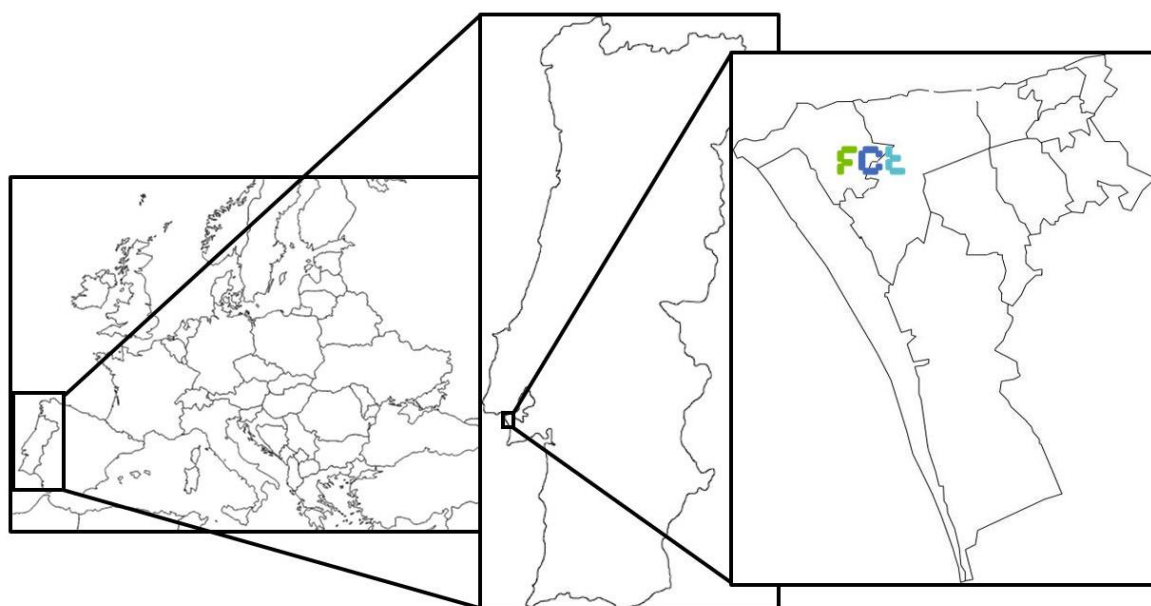


Figura 4.1 – Localização da FCT/UNL.

Criada em 1977, aquando da reorganização de vários departamentos e cursos da Universidade Nova de Lisboa, a FCT/UNL apresenta a particularidade de possuir diversos edifícios construídos em anos diferentes e com arquiteturas e materiais de construção distintos. Neste sentido, a escolha dos edifícios para o presente estudo teve como fator

preponderante as suas semelhanças tanto em termos arquitetónicos, como dos materiais construtivos utilizados, de forma a evitar incompatibilidades nos dados recolhidos. A Figura 4.2 mostra a localização dos dois edifícios escolhidos, enquanto a Figura 4.3 evidencia a semelhança entre os mesmos.

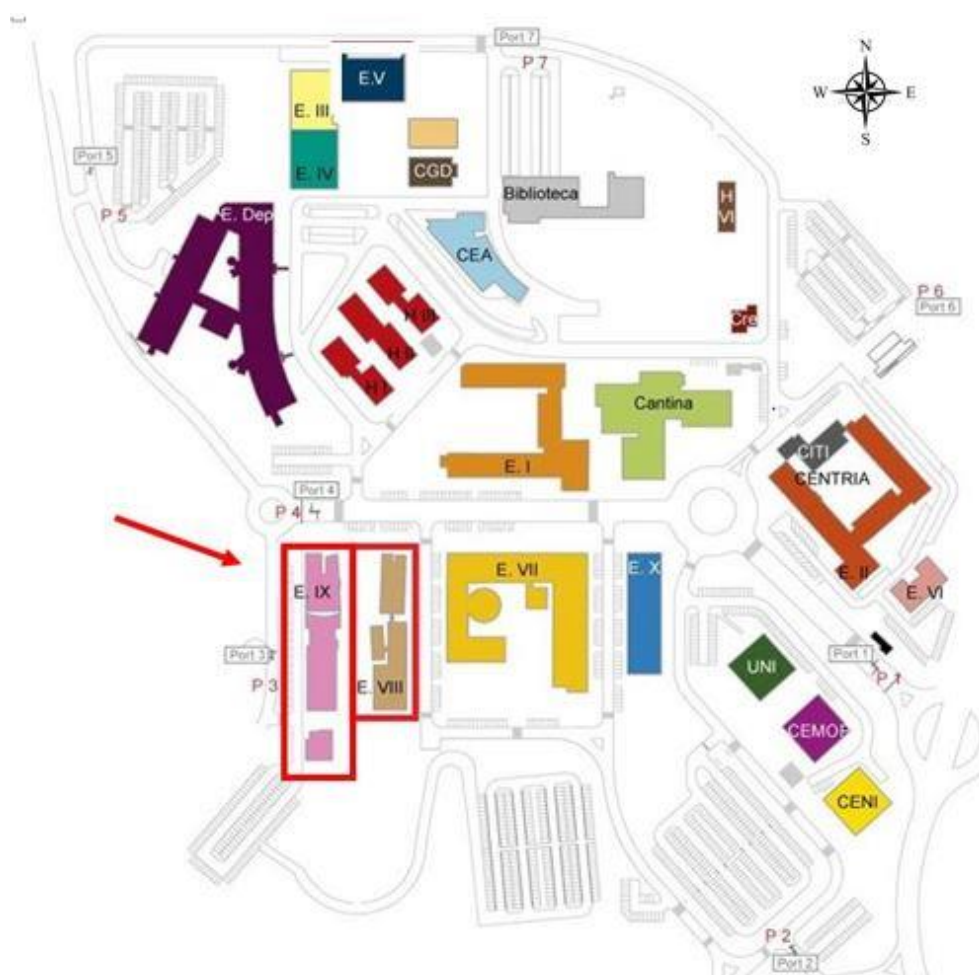


Figura 4.2 – Planta do *campus* da FCT/UNL (retirado de [37]).



Figura 4.3 – Edifícios escolhidos para o presente estudo. À esquerda o Edifício VIII e à direita o Edifício IX (retirado de [38]).

O Edifício VIII acolhe os departamentos de Mecânica e Gestão Industrial enquanto no Edifício IX estão presentes os departamentos de Ciências da Terra e Engenharia Civil. Ambos os edifícios possuem quatro pisos com uma zona destinada apenas para escritórios, zona norte no Edifício VIII e zona sul no Edifício IX. Nos dois pisos inferiores encontram-se, maioritariamente, laboratórios e nos dois pisos superiores as salas de aula.

Todas as salas de aula estão equipadas com o material necessário para as atividades letivas como cadeiras, mesas, quadros de escrita e projetores.

Ambos os edifícios estão equipados com sistemas AVAC, contudo não está operacional no Edifício IX e no Edifício VIII funciona apenas no piso quatro e de forma deficiente.

4.2 Caracterização das Salas de Aula

As salas escolhidas para os ensaios destinam-se, apenas, para atividades letivas não laboratoriais, onde os ocupantes desenvolvem atividades sedentárias.

A seleção das salas efetuou-se de forma cuidada cumprindo quatro critérios: (1) a diferença de volumes entre as mesmas, uma vez que implicam capacidades de ocupação diferentes; (2) a frequência com que são utilizadas; (3) o número de alunos presente durante as aulas, pois o dióxido de carbono utilizado neste estudo como gás traçador, é proveniente

da atividade respiratória dos ocupantes; (4) o valor registado da concentração de CO₂ na medição preliminar.

De um universo de 41 salas de aula foram selecionadas 8 para serem analisadas neste trabalho. De forma a realizar um estudo que contemplasse salas de pisos diferentes, começou por se selecionar quatro salas de aula de cada edifício, duas por piso, tendo em consideração os critérios acima referidos. Contudo, devido à inexistência de salas de menores dimensões no terceiro piso do Edifício IX surgiu a necessidade de escolher uma sala do segundo piso com essa característica.

O quadro que se segue mostra algumas das características das salas de aula selecionadas, que se revelam importantes para a análise dos dados recolhidos.

Quadro 4.1 – Principais características das salas de aula

Edifício	Sala	Volume [m ³]	Área [m ²]	Capacidade	Vãos		Código
					nº	Tipo	
VIII	3.4	134,8	44,9	38	2	1 porta interior e 1 janela	VIII_3.4
	3.9	337,8	112,6	101	5	2 portas interiores e 3 janelas	VIII_3.9
	4.6	126,6	42,3	28	3	1 porta interior e 2 janelas	VIII_4.6
	4.8	438	146	94	5	2 portas interiores e 3 janelas	VIII_4.8
IX	2.23	135,2	45,1	33	3	1 porta interior e 2 janelas	IX_2.23
	3.19	222,9	74,3	56	6	2 portas interiores e 4 janelas	IX_3.19
	4.15	272,4	90,8	50	5	2 portas interiores e 3 janelas	IX_4.15
	4.23	132,9	44,3	28	3	1 porta interior e 2 janelas	IX_4.23

No conjunto das quatro salas do Edifício VIII, as salas VIII_3.9 e VIII_4.8 são as de maior volume com, respetivamente, 337,8 m³ e 438 m³. As salas VIII_3.4 e VIII_4.6 estão reservadas para aulas com menor número de alunos e são por isso de menores dimensões, com 44,9 m² e 42,9 m² respetivamente. Todas as salas possuem porta(s) de madeira de duas folhas e janelas com vedante do tipo basculante inferior, vidro simples e caixilharia de alumínio. O sistema de sombreamento das janelas é com persianas metálicas exteriores do tipo venezianas, como ilustra a Figura 4.4.



Figura 4.4 – Exemplo ilustrativo do sistema de sombreamento e do tipo de janela do Edifício VIII.

No Edifício IX todas as salas possuem porta(s) de madeira de duas folhas e janelas de vidro duplo com vedante e caixilharia de alumínio. A sala IX_2.23 possui um volume de 135,2m³ e as suas janelas são do tipo pivot, Figura 4.5. É necessário referir que estas janelas distam entre 2 a 3 metros da parede do edifício vizinho, justificando a sua tipologia. A Figura 4.6 mostra uma representação esquemática da situação descrita.

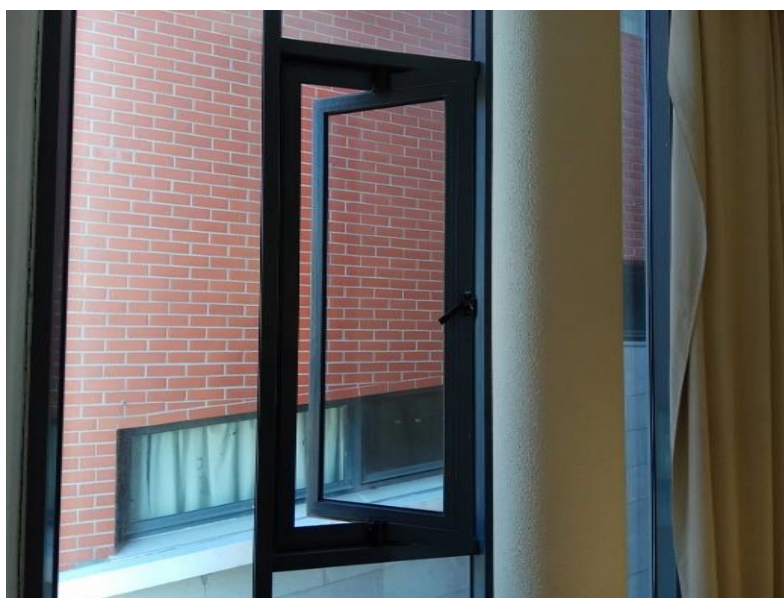


Figura 4.5 - Exemplo ilustrativo do tipo de janela presente na Sala IX_2.23.

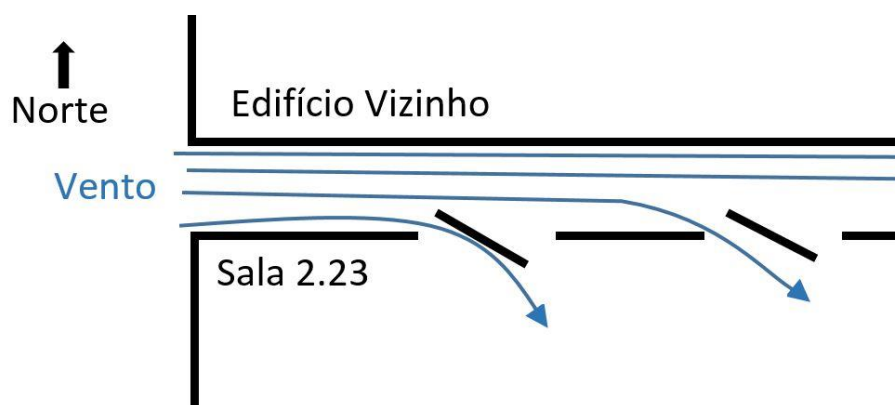


Figura 4.6 – Representação esquemática da circulação do vento na fachada da sala 2.23 do Edifício IX.

A sala IX_4.15 dispõe de um volume de 272,4m³, possui três janelas de correr com 3 folhas e uma janela basculante inferior. A sala IX_3.19 é uma das salas de maior volume com 222,9m³ ao contrário da sala IX_4.23 que apresenta um volume de 132,9 m³. Nestes dois compartimentos, a tipologia das janelas é de correr com três e quatro folhas, respetivamente. O sombreamento das janelas do edifício IX, que complementam as palas horizontais exteriores nas janelas do edifício, é conseguido com cortinados opacos de correr, como ilustra a Figura 4.7.

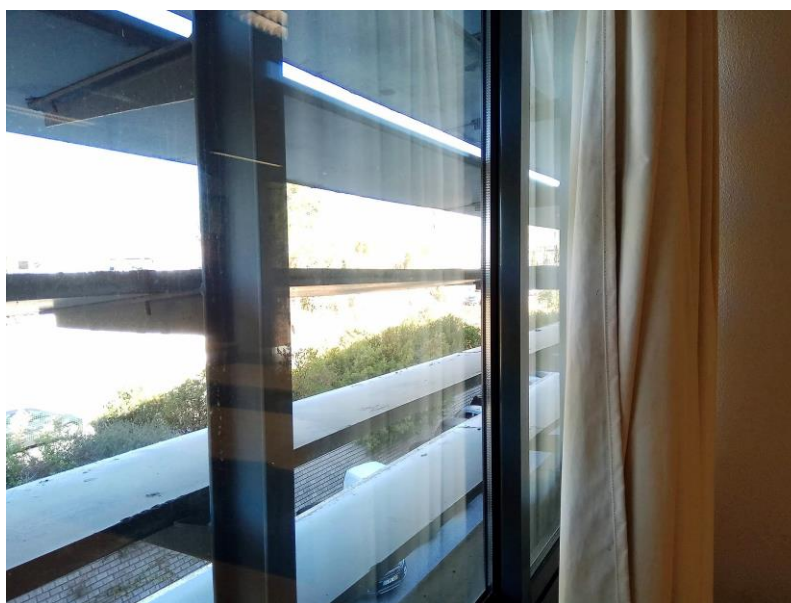


Figura 4.7 – Exemplo ilustrativo do sistema de sombreamento e do tipo de janela do Edifício IX.

Ocupação média das salas de aula

O Quadro 4.2 apresenta um levantamento do número de alunos que utiliza as salas de aula selecionadas para o presente estudo. É de salientar que este levantamento efetuou-se através dos registos de inscrições de alunos nas aulas durante o primeiro semestre do ano

letivo de 2016/2017. O principal objetivo deste levantamento passa por aferir o número médio de estudantes por aula e por cada sala de aula estudada, durante o período de setembro a dezembro do ano letivo 2016/2017, sendo que este valor é dado a partir da última coluna do quadro.

Quadro 4.2 – Ocupação das salas de aula no total e em média ao longo da semana no período de setembro a dezembro de 2016.

Edifício	Sala	2ª feira		3ª feira		4ª feira		5ª feira		6ª feira		Média
		Total	Média	Total	Média	Total	Média	Total	Média	Total	Média	
VIII	3.4	112	28	87	29	35	35	124	31	77	39	32
	3.9	250	83	341	85	140	70	274	69	194	65	74
	4.6	21	21	48	24	0	0	42	14	57	19	16
	4.8	339	85	155	52	140	70	232	46	230	77	66
IX	2.23	104	26	47	16	49	25	69	17	51	26	22
	3.19	163	41	191	48	44	22	186	37	66	33	36
	4.15	56	28	55	18	110	28	74	37	66	22	27
	4.23	0	0	43	22	22	22	31	31	49	25	20

4.3 Descrição dos Métodos de Medições

As medições decorreram ao longo de um período de 40 dias da estação de aquecimento, entre 7 de novembro e 16 de dezembro de 2016.

Numa fase inicial realizou-se um levantamento preliminar de todas as salas de aula dos edifícios em estudo, num total de 41 salas, de modo a aferir aquelas com maior potencial para possuírem problemas relacionados com a ventilação, sendo que todos os dados recolhidos sobre as salas foram, metodicamente, registados numa ficha criada especificamente para o efeito (ver apêndice 1). Nesta fase foram selecionados períodos de elevada ocupação das salas e efetuadas medições isoladas, registando os valores de concentração de CO₂ obtidos. As medições tiveram a duração mínima de 15 minutos, tempo necessário para a estabilização das medições do aparelho e respeitando a duração mínima de 5 minutos prevista na Nota Técnica NT-SCE-02 [39]. É de salientar que os valores de CO₂ obtidos nestas medições iniciais revelaram-se essenciais para a seleção das salas de aulas a estudar.

A segunda fase das medições realizou-se nas salas já previamente selecionadas e de modo a não causar alterações significativas ao normal funcionamento das mesmas. Desta forma, os aparelhos de medição eram colocados, sobre o retroprojetor, antes do último período de aulas

e permaneciam a medir durante as horas seguintes. A escolha da colocação dos aparelhos de medição sobre o retroprojektor prendeu-se com o facto de ser um local de difícil acesso, impedindo que terceiros mexessem no equipamento, e por ser um local longe de obstruções, de fontes de poluição e/ou de ar novo, como portas e janelas, como mostra a Figura 4.8. As principais preocupações durante as medições centraram-se na verificação da saída de todos os alunos e docentes das salas no final da aula e na garantia de que a porta era fechada e trancada no decorrer de cada medição. Esta última medida salvaguardava que nenhum aluno ou docente pudesse entrar na sala e, desta forma, influenciar os dados recolhidos quer por gerar mais dióxido de carbono, quer por aumentar os fluxos de entrada de ar novo através da abertura de portas e janelas.

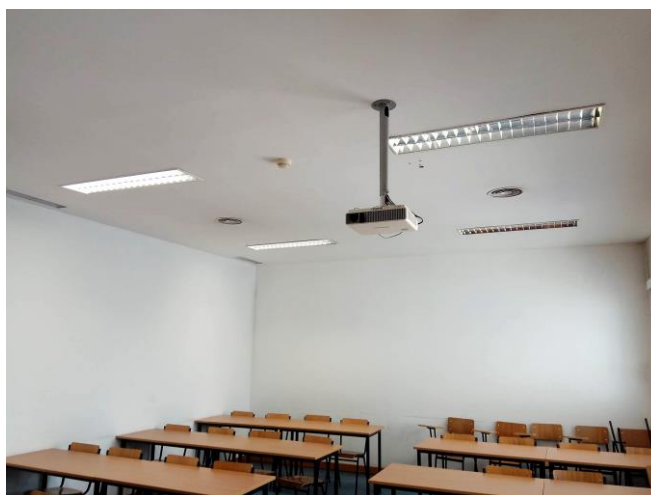


Figura 4.8 – Exemplo de localização do retroprojektor, sala VIII_4.6

Ao longo das duas fases de medições foram utilizados três aparelhos. As medições das dimensões de todas as salas de aula foram efetuadas com um medidor laser de distâncias BOSCH DLE 70 Professional, Figura 4.9.



Figura 4.9 – Medidor laser de distâncias DLE 70 Professional.

A concentração de dióxido de carbono foi medida através de um detetor por absorção não-dispersiva de infravermelhos, modelo Telaire 7001. Contudo, as leituras de CO₂ foram registadas por intermédio de um *data logger* Hobo U12, que possui também a função de medir a temperatura e a humidade relativa do ar. A ligação entre os dois aparelhos efetuou-se através de um cabo CABLE-CO₂, em que o intervalo de medida entre aparelhos era de 0-2500 ppm. O *data logger* foi programado para efetuar registos da concentração de CO₂, da temperatura e da humidade relativa a cada minuto, de acordo com [27, 40]. A Figura 4. mostra os dois aparelhos descritos e os Quadros 4.3 e 4.4 apresentam as suas especificações técnicas.



Figura 4.10 – Detetor de CO₂ Telaire 7001 e *data logger* Hobo U12 (retirado de [41]).

Quadro 4.3 – Especificações técnicas do detetor de CO₂ - Telaire 7001 (adaptado de [41]).

Telaire 7001	
Intervalo de medida	0 - 10000 ppm no “display”
	0 - 2500 ppm ligação externa (CABLE-CO2)
	0 - 4000 ppm ligação externa (CABLE-2070)
Incerteza	± 50 ppm ou ± 5% do valor medido , o que for maior
Resolução	± 1 ppm

Quadro 4.4 – Especificações técnicas do *data logger* Hobo U12 (adaptado de [41]).

Hobo U12		
Intervalo de medida	Temperatura	-20° até 70° C
	Humidade relativa	5% até 95%
	Ligação externa	0 até 2,5 DC volts
Incerteza	Temperatura	$\pm 0,35^{\circ}\text{C}$ de 0° até 50°C
	Humidade relativa	$\pm 2,5\%$ de 10% até 90%
	Ligação externa	$\pm 2,5\%$ da leitura absoluta
Resolução	Temperatura	0,03°C a 25°C
	Humidade relativa	0,03%

Ambos os detetores de concentração de dióxido de carbono tinham, na altura das medições, a calibração dentro do período de validade que consta nas especificações fornecidas pelo fabricante.

De modo a concretizar os objetivos previstos, todos os dados e informações recolhidas nos diferentes ensaios foram organizados em folhas de cálculo do programa computacional EXCEL da Microsoft. Para cada ensaio elaborou-se uma folha de cálculo onde se colocou toda a informação sobre a evolução temporal da temperatura, da humidade relativa interior e da concentração de CO₂ observada dentro dos compartimentos em estudo. Para a análise dos dados e obtenção das taxas de renovação horária utilizou-se o método dos mínimos quadrados, disponibilizado pelo mesmo programa, através da regressão linear. De modo a conseguir um maior rigor científico, as taxas de renovação horária foram também determinadas pelo cálculo da média dos módulos dos declives entre medições consecutivas. A escolha da duração do troço analisado foi efetuada iterativamente tendo em conta a R_{ph} obtida e a constante de tempo nominal, τ_n .

É de salientar que antes de qualquer medição em qualquer sala era medida e registada a concentração exterior de CO₂ com o objetivo de realizar uma comparação dos dados recolhidos de uma forma mais exata.

Capítulo 5

Apresentação e Análise dos Resultados

O presente capítulo encontra-se dividido em três secções. Na primeira secção, para cada sala, começa-se por apresentar e descrever os dados recolhidos durante os ensaios realizados referentes aos níveis de CO₂, humidade relativa e temperatura. Em seguida analisam-se os dados recolhidos apresentando os gráficos referentes ao tratamento dos dados. Na segunda secção elabora-se uma comparação com a legislação em vigor das taxas de renovação horária obtidas e dos níveis de CO₂ registados, tanto na recolha preliminar como nos ensaios das salas.

5.1 Tratamento dos dados

5.1.1 Edifício VIII

Sala 3.4

A Figura 5.1 apresenta os dados recolhidos no ensaio da sala VIII_3.4 que decorreu nos dias 24 e 25 de novembro de 2016, quinta e sexta-feira respetivamente.

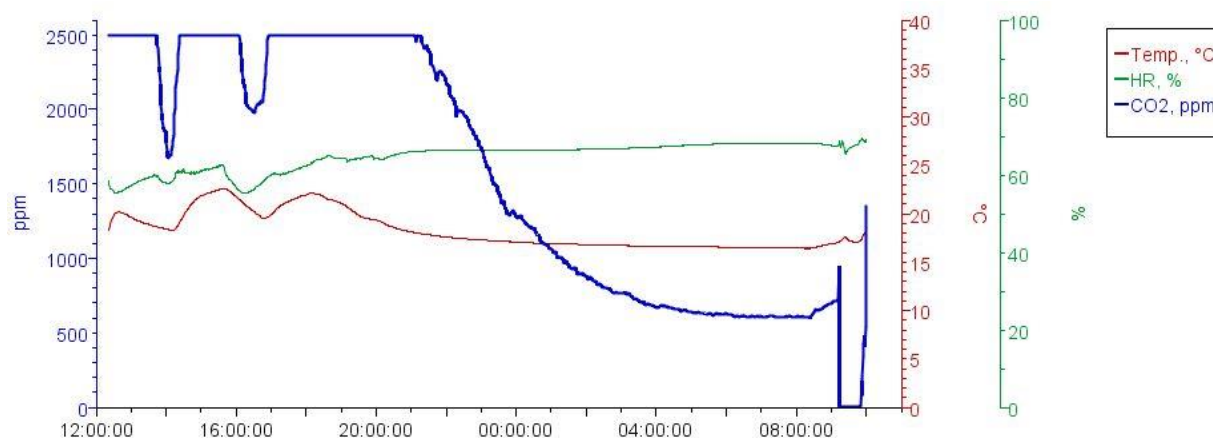


Figura 5.1 – Dados recolhidos nos dias 24 e 25 de novembro de 2016 na sala VIII_3.4

Devido à frequente utilização da sala durante o dia, foi necessário preparar e instalar os aparelhos no período de troca de aulas, enquanto uma turma abandonava a sala para dar lugar à turma seguinte. Esta é a razão para o registo de concentração de CO₂ se iniciar em 2500 ppm, limite máximo gravado pelo aparelho. Este valor mantém-se constante, com exceção de duas quebras registadas entre as 13h40 e as 14h20, e entre as 16h00 e as 16h50, associadas a períodos

de entrada e saída de alunos das aulas. Às 19h30, hora a que terminou a última aula do dia, foram fechadas todas as portas e janelas e iniciou-se o período de declive da concentração de CO_2 . Devido às limitações do aparelho de medição, o registo do declive só acontece a partir das 21h06 e prolonga-se até às 05h00, hora a que é atingido um equilíbrio da concentração de 630 ppm.

Os valores obtidos para a humidade relativa e para a temperatura mostram uma pequena variação durante as horas em que estão a decorrer aulas, mas atingem um valor aproximadamente constante no restante registo, de 70% e 17°C respetivamente.

O valor registado para a concentração exterior de CO_2 , recolhido no dia 24 de novembro, foi de 503 ppm e na recolha preliminar da concentração de CO_2 , realizada após uma aula, foi registado um valor de 6620 ppm.

Para se proceder à análise da sala escolheu-se o troço das 21h00 à 01h00, com a duração de 4 horas, onde se obteve uma constante de tempo nominal, τ_n , de 2,86 h. Com o logaritmo natural da concentração, C , dado pela diferença entre a concentração exterior e a concentração interior no momento t , foi possível efetuar uma regressão linear e obter a equação representada na Figura 5.2. Esta equação tem um coeficiente de determinação, R^2 , de 0,9831 e um declive, que representa as R_{ph} , de 0,35 h^{-1} .

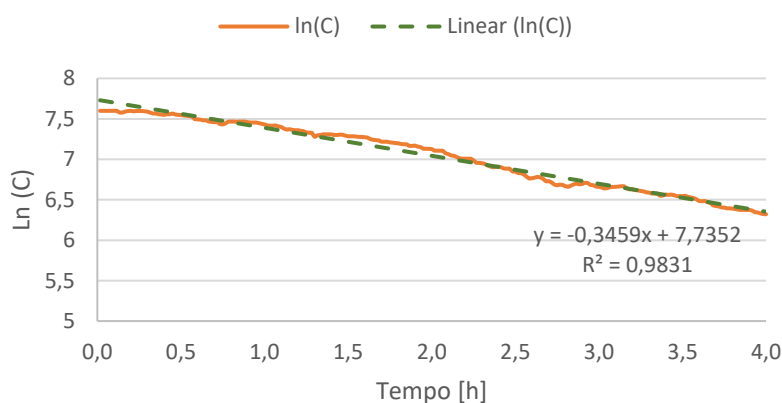


Figura 5.2 – Gráfico da regressão linear da sala VIII_3.4

Procedeu-se a outra determinação das R_{ph} , através da equação (3.5) referente ao cálculo da média dos módulos dos declives entre medições consecutivas e obteve-se um valor de 0,32 h^{-1} .

Por forma a verificar as R_{ph} obtidas, desenharam-se duas curvas teóricas recorrendo à equação (3.2). Os resultados encontram-se representados na Figura 5.3 e mostram uma aproximação satisfatória das curvas teóricas à curva experimental.

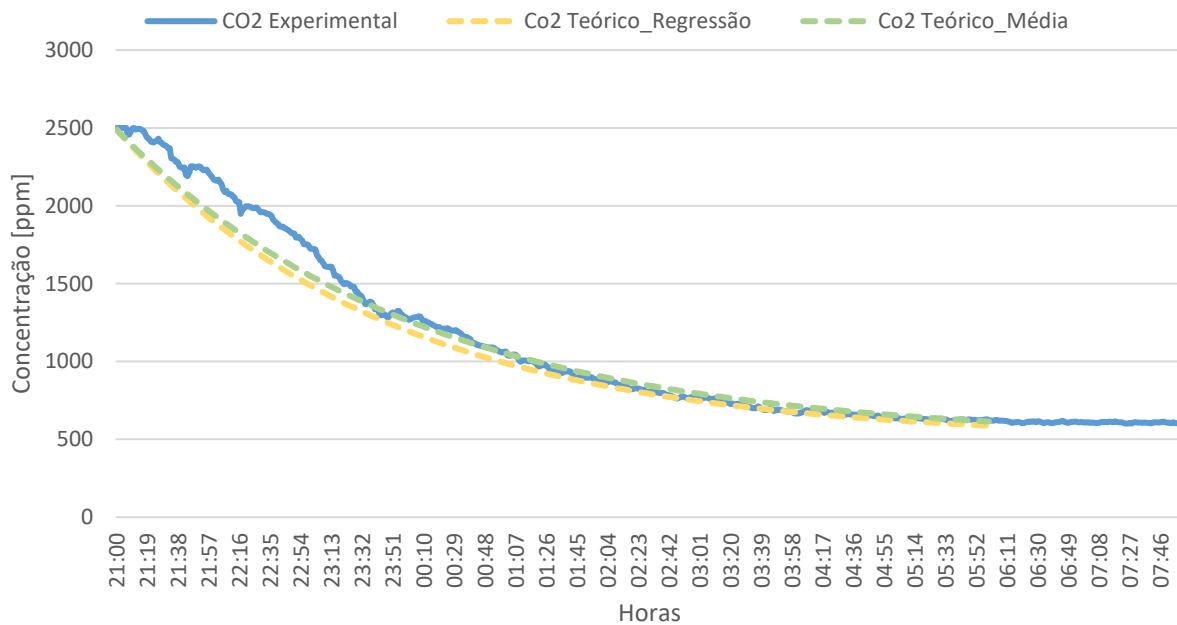


Figura 5.3 – Representação da curva experimental e das curvas teóricas de concentração de CO₂ da sala VIII_3.4

Sala 3.9

Na Figura 5.4 mostram-se os dados recolhidos no ensaio da sala VIII_3.9 que se realizou nos dias 23 e 24 de novembro de 2016, quarta e quinta-feira respetivamente.

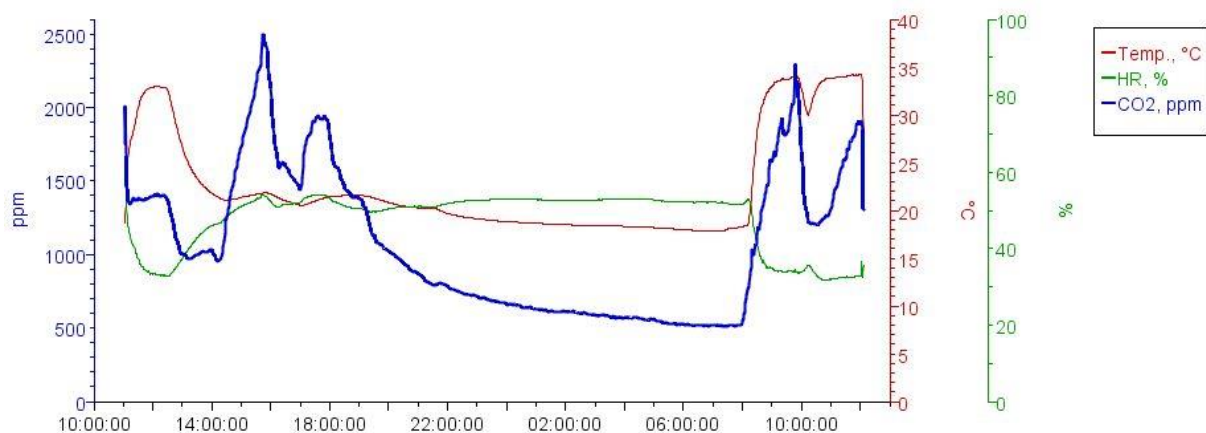


Figura 5.4 – Dados recolhidos nos dias 23 e 24 de novembro de 2016 na sala VIII_3.9

O aparelho foi instalado às 11h00 e os registos da concentração de CO₂ obtidos refletem a utilização da sala durante o dia. São evidentes dois picos de valores de concentração de CO₂ no dia 23, um às 15h48 e outro às 17h40, e outros dois picos no dia 24, às 09h46 e às 12h03. Às 17h30, hora a que terminou a última aula do dia, foram fechadas todas as portas e janelas e iniciou-se o período de declive da concentração de CO₂. Devido ao facto da última aula do dia não coincidir com a hora de encerramento do edifício, pediu-se aos seguranças que trancassem a porta da sala, para que esta não pudesse voltar a ser utilizada pelos alunos como sala de estudo enquanto decorria o ensaio. O equilíbrio da concentração de CO₂ é atingido às 05h30 com um valor de 530 ppm.

Os valores obtidos para a humidade relativa e para a temperatura evidenciam uma variação durante as horas em que estão a decorrer aulas, mas atingem um valor aproximadamente constante no período do decaimento da concentração de CO₂, de 53% e 19°C respetivamente.

O valor registado para a concentração exterior de CO₂, recolhido no dia 23 de novembro, foi de 515 ppm e na recolha preliminar da concentração de CO₂, realizada após uma aula onde todas as janelas se encontravam abertas, foi registado um valor de 908 ppm.

Na análise desta sala obteve-se uma constante de tempo nominal, τ_n , de 2,38 h sendo escolhido o troço das 17h30 às 20h30, com a duração de 3 horas. Ao calcular o logaritmo natural da concentração, C , foi possível efetuar uma regressão linear e obter a equação representada na Figura 5.5. Esta equação tem um coeficiente de determinação, R^2 , de 0,9829 e um declive, que representa as R_{ph} , de 0,44 h⁻¹.

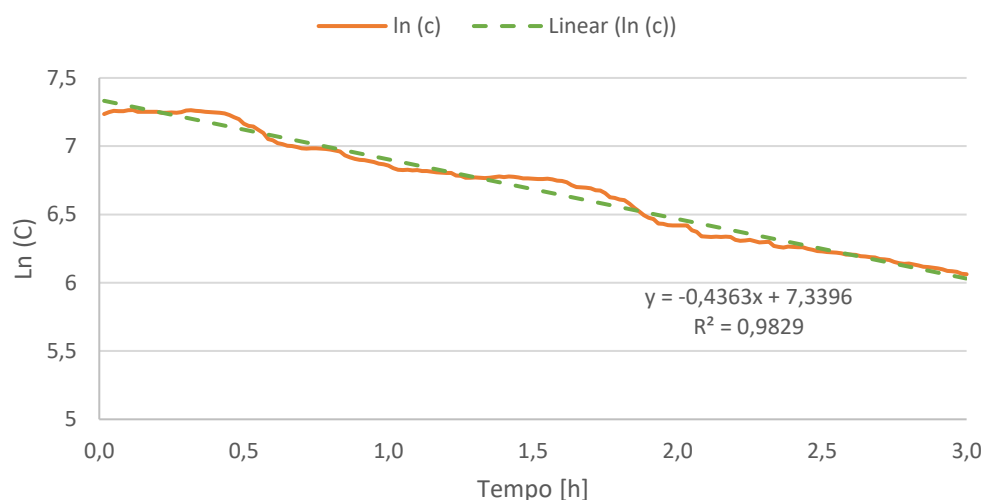


Figura 5.5 – Gráfico da regressão linear da sala VIII_3.9

A determinação das R_{ph} , através do cálculo da média dos módulos dos declives entre medições consecutivas, originou um valor de $0,39 \text{ h}^{-1}$.

A Figura 5.6 mostra o desenvolvimento da curva experimental comparativamente às curvas teóricas obtidas pela equação (3.2) com as R_{ph} determinadas. Ao analisar esta figura é possível comprovar uma aproximação satisfatória das curvas teóricas à curva experimental.

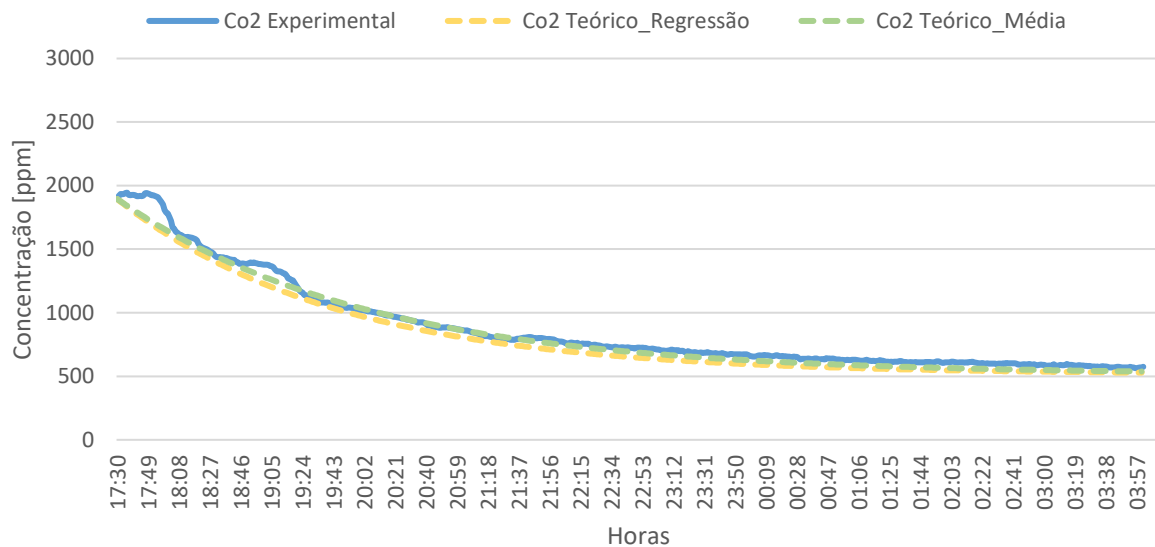


Figura 5.6 – Representação da curva experimental e das curvas teóricas de concentração de CO_2 da sala VIII_3.9

Sala 4.6

A Figura 5.7 revela os dados recolhidos no ensaio da sala VIII_4.6 ocorrido nos dias 12 e 13 de dezembro de 2016, segunda e terça-feira respetivamente.

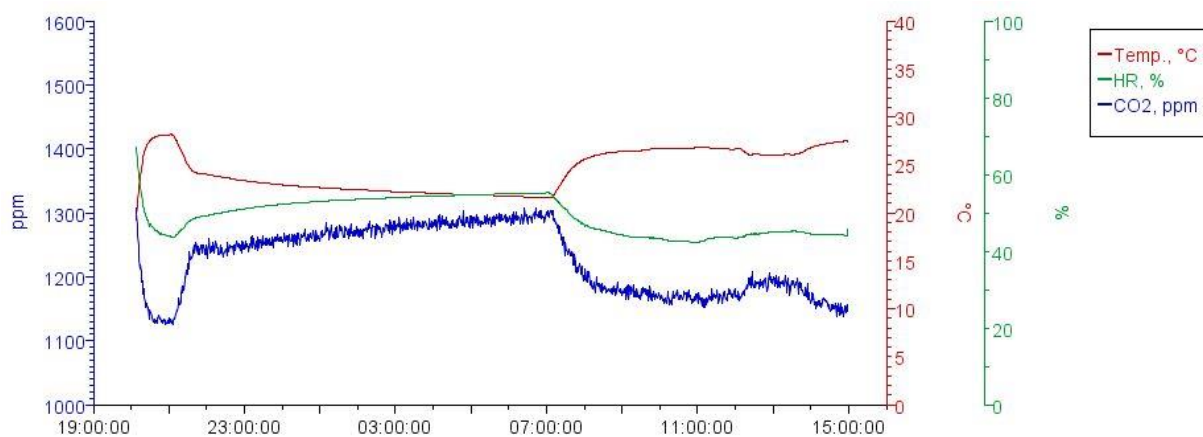


Figura 5.7 – Dados recolhidos nos dias 12 e 13 de dezembro de 2016 na sala VIII_4.6

A instalação do aparelho foi efetuada às 20h00, hora a que terminou a última aula do dia, e foram fechadas todas as portas e janelas. Para uma melhor análise do ensaio, e uma vez que as variações do nível de concentração de CO₂ não se revelaram muito significativa ao longo de todo o registo, sentiu-se necessidade de modificar a escala do gráfico.

Os registos deste ensaio são caracterizados pela existência de um “ruído” ao longo de toda a medição que resultam numa curva representativa da concentração de CO₂ muito instável. Contudo, é possível observar uma diminuição na concentração de CO₂ pouco tempo depois do início do ensaio, seguido de um período de aumento que ocorreu das 21h00 até às 07h00 do dia seguinte. Das 07h00 até às 08h00 é visível um período de decréscimo do nível do CO₂ que, com o início das aulas, volta a subir atingindo um pico às 13h00.

Os valores obtidos para a humidade relativa revelam um decréscimo nos momentos iniciais do ensaio seguidos de um aumento constante mas pouco significativo, até aos 56%. Este aumento é interrompido às 07h00 seguindo-se um período de diminuição que estabiliza nos 43% de HR.

Para a temperatura, a variação da curva sofre alterações nos mesmos períodos que a concentração de CO₂ e da HR com um aumento no período inicial até aos 28°C, seguido de um período de decréscimo que termina às 07h00 com 21°C.

O valor registado para a concentração exterior de CO₂, recolhido no dia 12 de dezembro, foi de 523 ppm e na recolha preliminar da concentração de CO₂, realizada num período sem aula, foi registado um valor de 779 ppm.

Ao estudar a Figura 5.7 torna-se possível compreender a inviabilidade de se realizar uma análise dos dados recolhidos. Tal como já referido, os principais motivos deste constrangimento passam pela: (1) inexistência de um período de decaimento, corroborado pela ocorrência de um ligeiro aumento do nível de CO₂; (2) existência de um “ruído” ao longo de toda a medição. O ponto (1) é facilmente explicado pela, possível, permanência de pessoas dentro da sala durante o período do ensaio. Uma vez que este se efetuou, maioritariamente, no período da noite, das 20h00 às 14h00, e tratando-se de uma sala de pequenas dimensões, é provável que os responsáveis pela segurança do edifício possam ter utilizado a sala, explicando desta forma o ligeiro aumento do nível de CO₂. O ponto (2) pode ser explicado por uma anomalia na recolha dos dados por parte do aparelho ou, muito possivelmente, pela

influência do funcionamento deficiente e intermitente do sistema de ventilação mecânico existente no Edifício VIII, e que afeta apenas o piso 4.

Sala 4.8

Na Figura 5.8 são apresentados os dados recolhidos no ensaio da sala VIII_4.8 que decorreram no dia 24 e 25 de novembro de 2016, quinta e sexta-feira respetivamente.

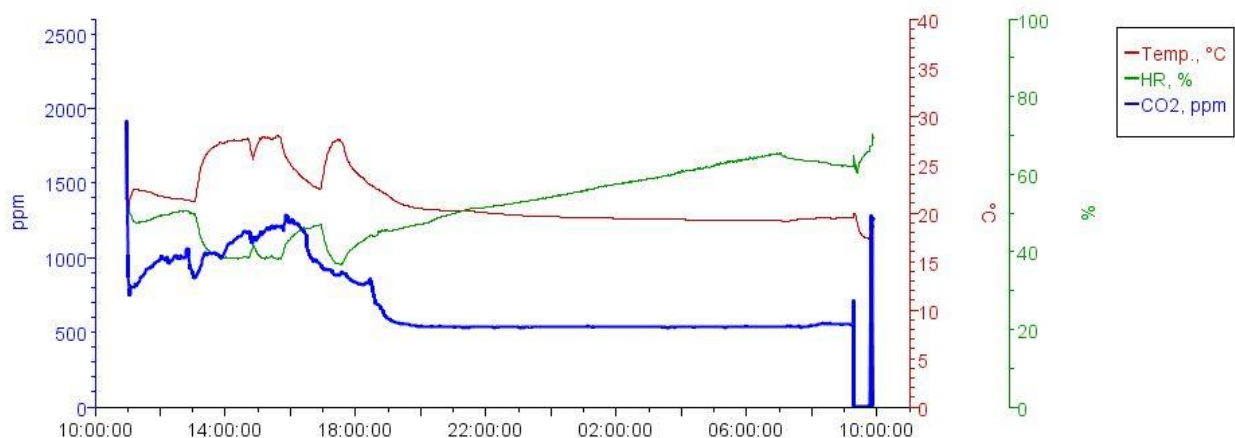


Figura 5.8 – Dados recolhidos nos dias 24 e 25 de novembro de 2016 na sala VIII_4.8

Instalou-se o aparelho às 11h00 e os registos da concentração de CO₂ obtidos refletem a utilização da sala durante o dia. No início do gráfico é representado um pico na concentração de CO₂ que deve ser ignorado, visto representar os instantes iniciais do ensaio nos momentos imediatamente posteriores ao aparelho ter sido ligado. Às 16h00, hora a que terminou a última aula do dia, foram fechadas todas as portas e janelas e iniciou-se o período de declive da concentração de CO₂. Devido ao facto da última aula do dia não coincidir com a hora de encerramento do edifício, foi pedido aos seguranças que trancassem a porta da sala para que esta não pudesse voltar a ser utilizada pelos alunos como sala de estudo enquanto decorria o ensaio. Constatou-se, posteriormente, que a porta tinha a fechadura estragada não sendo possível trancá-la, por isso deixou-se um aviso fixado na porta a informar que estava a decorrer um ensaio e a solicitar que a mesma não fosse aberta. O equilíbrio da concentração de CO₂ é atingido às 19h00 com um valor de 535 ppm.

Os valores obtidos para a humidade relativa e para a temperatura indicam uma variação durante as horas em que estão a decorrer aulas seguindo-se um período de estabilização. No

caso da humidade relativa verifica-se um crescimento constante que atinge 65% às 07h04. Para a temperatura verifica-se um decrescimento que atinge o equilíbrio nos 19°C.

O valor registado para a concentração exterior de CO₂, recolhido no dia 24 de novembro, foi de 503 ppm e na recolha preliminar da concentração de CO₂, realizada após uma aula, foi registado um valor de 1085 ppm.

Através da análise à sala obteve-se uma constante de tempo nominal, τ_n , de 1,67 h sendo escolhido o troço das 15h00 às 22h00, com a duração de 7 horas. A diferença entre a constante de tempo nominal e a duração do ensaio deve-se ao facto de não ter sido possível encontrar um balanço entre os dois valores, tendo-se optado pela duração do ensaio em que se obteve o maior valor de coeficiente de determinação. Calculado o logaritmo natural da concentração, C , realizou-se uma regressão linear originando a equação representada na Figura 5.9. Esta equação tem um coeficiente de determinação, R^2 , de 0,9171 e um declive, que representa as R_{ph} , de 0,6h⁻¹.

A determinação das R_{ph} através do cálculo da média dos módulos dos declives entre medições consecutivas originou um valor de 0,42 h⁻¹.

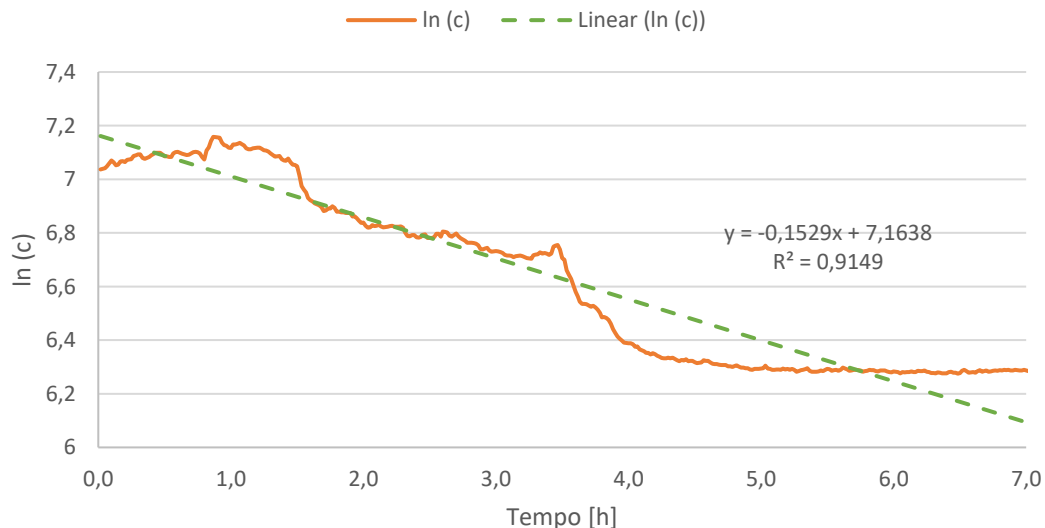


Figura 5.9 – Gráfico da regressão linear da sala VIII_4.8

A Figura 5.10 mostra o desenvolvimento da curva experimental comparativamente às curvas teóricas obtidas pela equação (3.2) com as R_{ph} determinados. Analisando a figura verifica-se uma aproximação muito pouco satisfatória das curvas teóricas à curva experimental. A causa para este resultado prende-se com a presença de várias perturbações

no nível de concentração de CO₂, ocorridas durante o ensaio e visíveis na Figura 5.8 bem como do reduzido decréscimo de concentração registado.

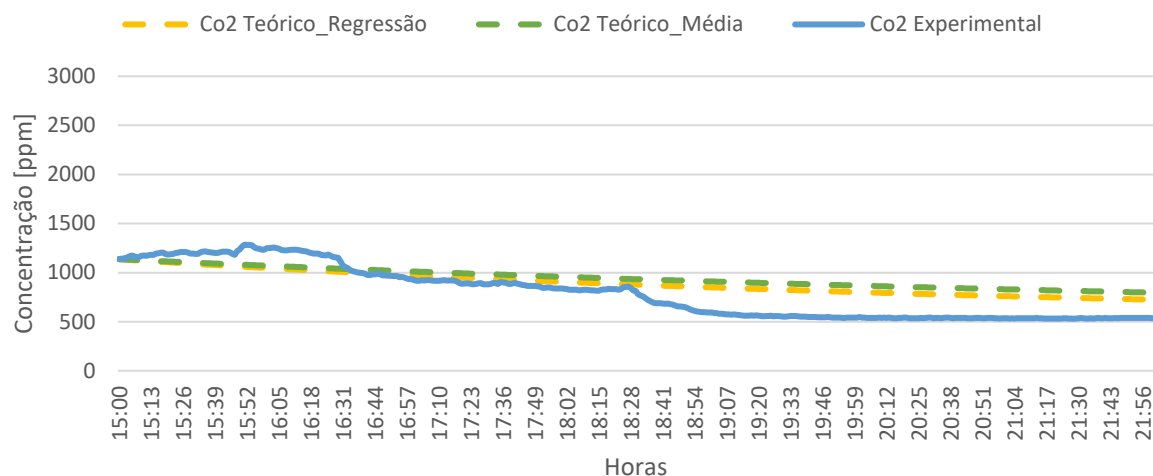


Figura 5.10 – Representação da curva experimental e das curvas teóricas de concentração de CO₂ da sala VIII_4.8

5.1.2 Edifício IX

Sala 2.23

Nos dias 21 e 22 de novembro de 2016, segunda e terça-feira respetivamente, realizou-se um ensaio onde se recolheram os dados da sala IX_2.23 tal como mostra a Figura 5.11.

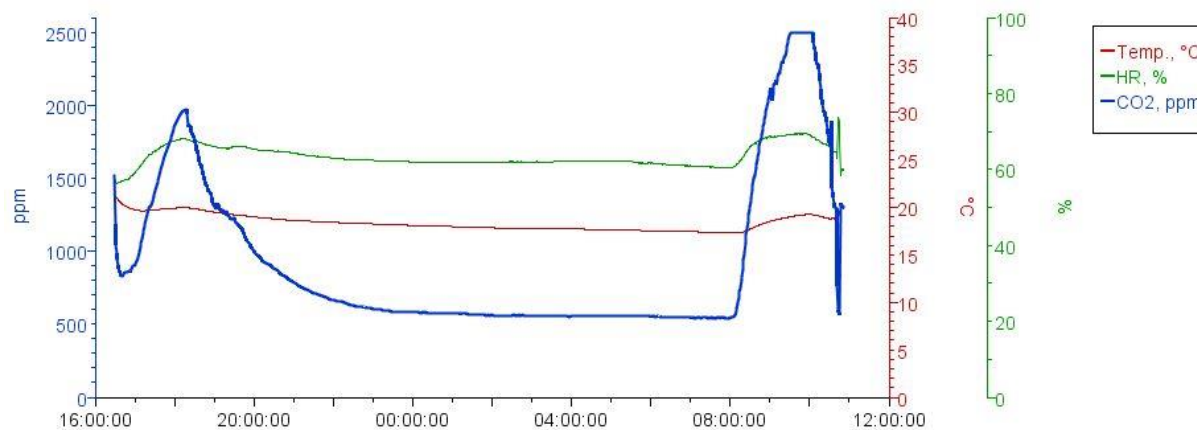


Figura 5.11 – Dados recolhidos nos dias 21 e 22 de novembro de 2016 na sala IX_2.23

Devido à frequente utilização da sala durante o dia, foi necessário preparar e instalar os aparelhos no período de troca de aulas, enquanto uma turma abandonava a sala para dar lugar à turma seguinte. O aparelho foi instalado às 16h30 e os registos da concentração de CO₂ obtidos nos momentos iniciais referem-se a uma aula com a duração de 1h30. São evidentes dois picos de valores de concentração de CO₂, um no dia 21 às 18h00 e outro no dia 22 às 09h30.

Às 18h00, hora a que terminou a última aula do dia, foram fechadas todas as portas e janelas e iniciou-se o período de declive da concentração de CO₂. Devido ao facto de a última aula do dia não coincidir com a hora de encerramento do edifício, foi pedido aos seguranças que trancassem a porta da sala para que esta não pudesse voltar a ser utilizada pelos alunos como sala de estudo enquanto decorria o ensaio. O equilíbrio da concentração de CO₂ é atingido às 23h30 com um valor de 570 ppm.

Os valores obtidos para a humidade relativa e para a temperatura mostram uma pequena variação durante as horas em que estão a decorrer aulas, mas atingem um valor aproximadamente constante no restante registo, de 62% e 18°C respetivamente.

O valor registado para a concentração exterior de CO₂, recolhido no dia 21 de novembro, foi de 579 ppm e na recolha preliminar da concentração de CO₂ realizada após uma aula, foi registado um valor de 1334 ppm.

Para analisar a sala escolheu-se o troço das 18h15 às 20h15, com a duração de 2 horas, onde se obteve uma constante de tempo nominal, τ_n , de 1,56 h. Com o logaritmo natural da concentração, C, foi possível efetuar uma regressão linear e obter a equação representada na Figura 5.12. Esta equação tem um coeficiente de determinação, R^2 , de 0,9786 e um declive, que representa as R_{ph} , de 0,64 h⁻¹.

A determinação das R_{ph} através do cálculo da média dos módulos dos declives entre medições consecutivas originou um valor de 0,70 h⁻¹.

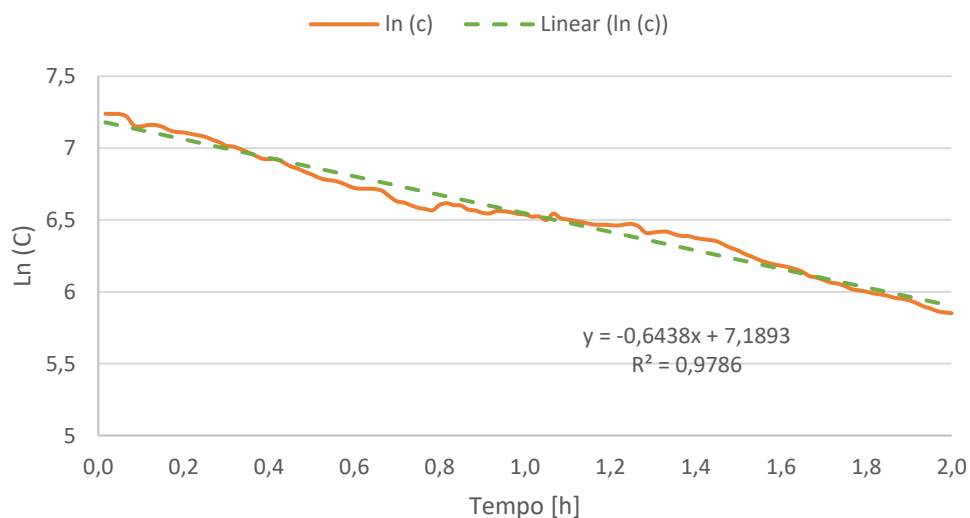


Figura 5.12 – Gráfico da regressão linear da sala IX_2.23

Por forma a verificar as R_{ph} obtidas, desenharam-se duas curvas teóricas recorrendo à equação (3.2). Os resultados encontram-se representados na Figura 5.13 e mostram uma aproximação satisfatória das curvas teóricas à curva experimental.

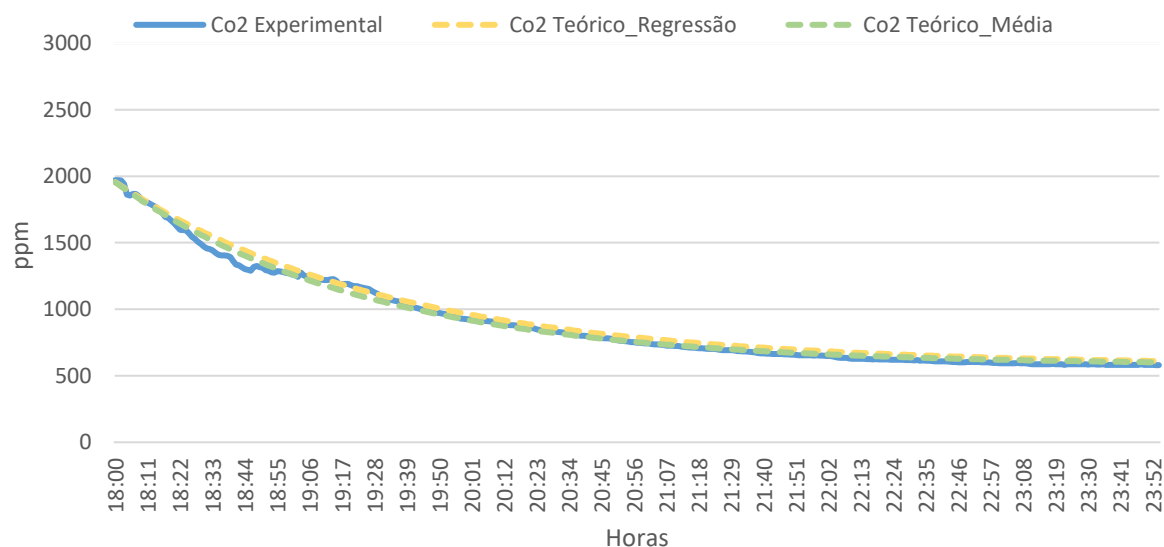


Figura 5.13 – Representação da curva experimental e das curvas teóricas de concentração de CO₂ da sala IX_2.23

Sala 3.19

Na Figura 5.14 mostram-se os dados recolhidos no ensaio da sala IX_3.19 que se realizou nos dias 22 e 23 de novembro de 2016, terça e quarta-feira respetivamente.

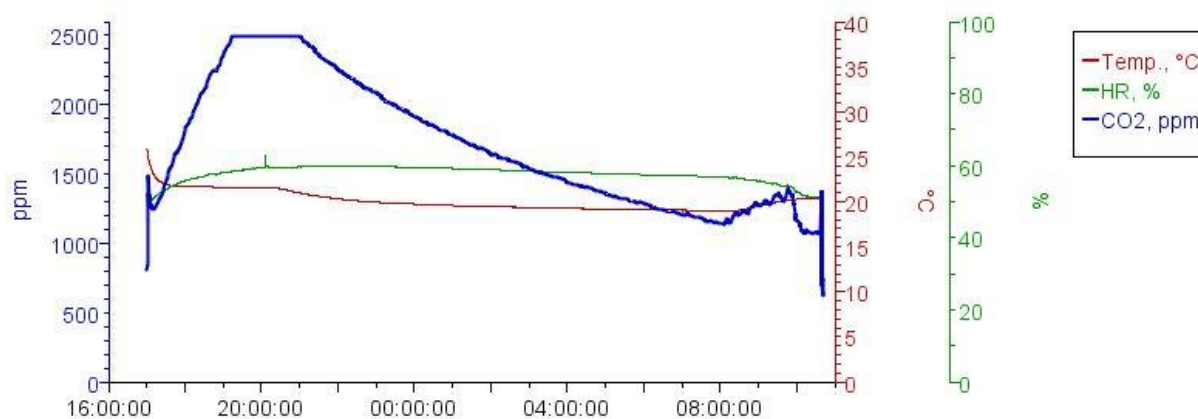


Figura 5.14 – Dados recolhidos nos dias 22 e 23 de novembro de 2016 na sala IX_3.19

A instalação do aparelho foi efetuada às 17h00 e os registos da concentração de CO₂ obtidos refletem a utilização da sala durante a última aula do dia. O patamar existente entre as 19h00 e as 21h00 deve-se à limitação do aparelho em gravar níveis de concentração de CO₂

acima das 2500 ppm, razão pela qual o registo do decaimento se inicia às 21h02 quando a última aula do dia terminou às 20h00. Neste ensaio não é atingido um equilíbrio no nível de concentração de CO₂ uma vez que o decaimento da curva é interrompido com o início das aulas do dia 23 de novembro às 08h00.

Os valores obtidos para a humidade relativa e para a temperatura não evidenciam uma grande variação no decorrer do ensaio atingindo um valor aproximadamente de 60% e 19°C respetivamente.

O valor registado para a concentração exterior de CO₂, recolhido no dia 22 de novembro, foi de 506 ppm e na recolha preliminar da concentração de CO₂, realizada após uma aula, foi registado um valor de 4162 ppm.

Na análise à sala obteve-se uma constante de tempo nominal, τ_n , de 10 h e foi escolhido o troço das 20h58 às 06h58, com a duração de 10 horas. Ao calcular o logaritmo natural da concentração, C, foi possível realizar uma regressão linear e obter a equação representada na Figura 5.15. Esta equação tem um coeficiente de determinação, R^2 , de 0,9946 e um declive, que representa as R_{ph} , de 0,10 h⁻¹.

A determinação das R_{ph} , através do cálculo da média dos módulos dos declives entre medições consecutivas, originou um valor de 0,07 h⁻¹.

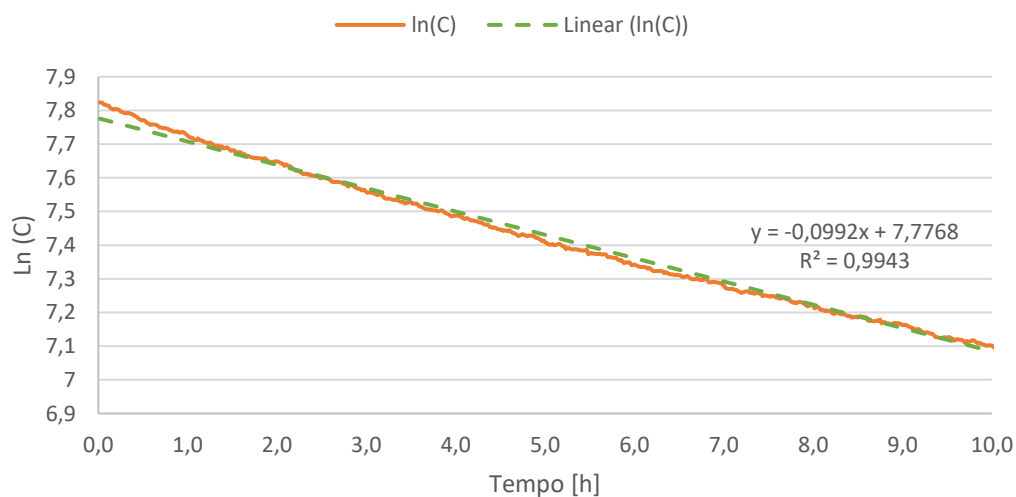


Figura 5.15 – Gráfico da regressão linear da sala IX_3.19

A Figura 5.16 evidencia o desenvolvimento da curva experimental comparativamente às curvas teóricas obtidas pela equação (3.2) com as R_{ph} determinadas. Ao analisar a figura é

possível verificar uma aproximação satisfatória da curva experimental por parte da curva teórica referente ao método da regressão linear. Contudo, a aproximação da curva teórica referente ao método da média dos módulos dos declives revela-se muito pouco satisfatória.

É de referir que a sala IX_3.19 revelou-se, verdadeiramente, muito pouco ventilada, não só pelos valores reduzidos de R_{ph} obtidos teoricamente, mas também por em 10 horas não ter conseguido atingir a concentração de CO_2 existente no exterior, 506 ppm.

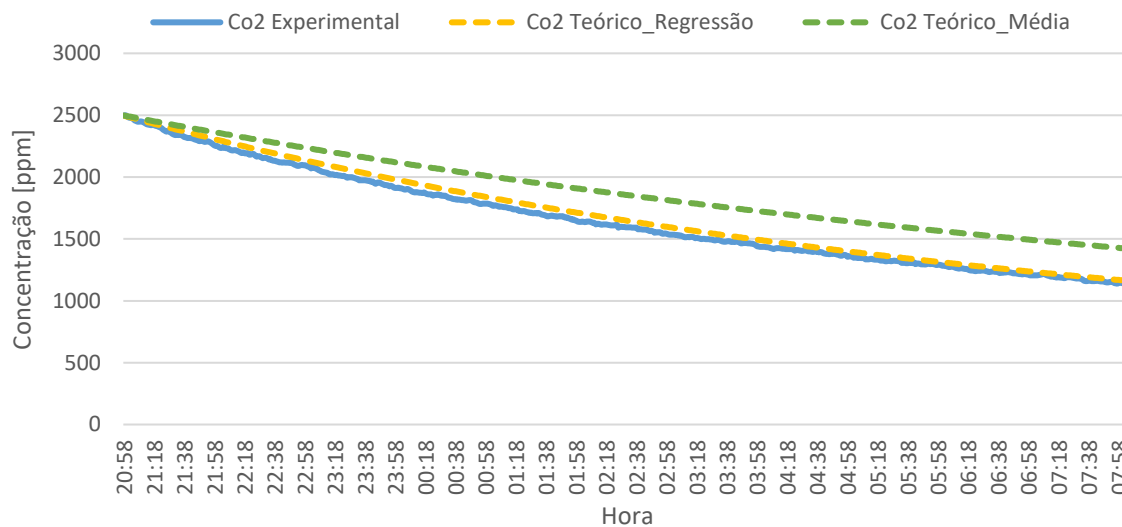


Figura 5.16 – Representação da curva experimental e das curvas teóricas de concentração de CO_2 da sala IX_3.19

Sala 4.15

A Figura 5.17 revela os dados recolhidos no ensaio da sala IX_4.15 ocorrido nos dias 22 e 23 de novembro de 2016, terça e quarta-feira respetivamente. Uma vez que esta sala apresenta uma frequente utilização durante o dia, os aparelhos foram preparados e instalados no período de troca de aulas, ou seja, enquanto uma turma abandonava a sala para dar lugar à turma seguinte.

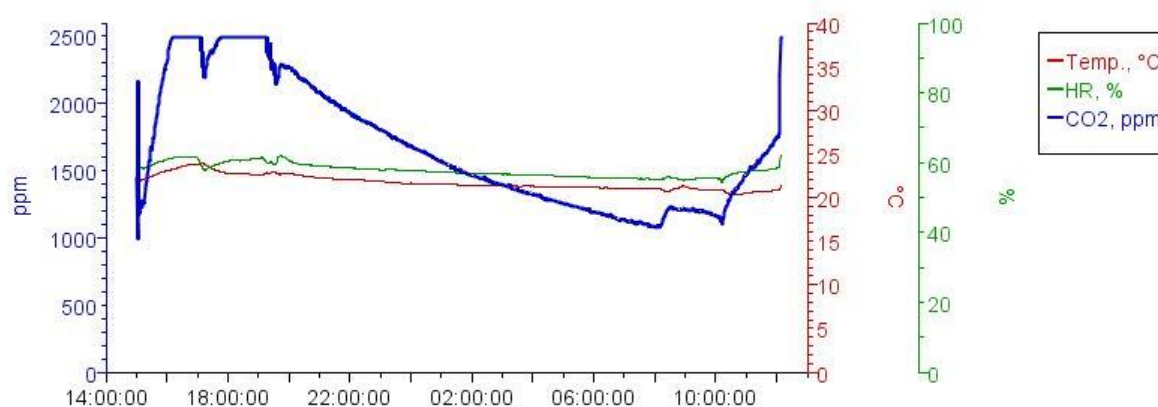


Figura 5.17 - Dados recolhidos nos dias 22 e 23 de novembro de 2016 na sala IX_4.15

Instalou-se o aparelho às 15h00 e no registo são evidentes dois patamares na curva de concentração de CO₂, um às 16h10 e outro às 17h50 do dia 22. Em ambos os casos foi excedido o limite de concentração de CO₂ medido pelo aparelho no decorrer das aulas. Às 19h00, hora a que terminou a última aula do dia, foram fechadas todas as portas e janelas e iniciou-se o período de declive da concentração de CO₂. É de destacar a perturbação existente das 19h00 às 19h30, que corresponde à saída dos alunos da sala de aula e à limpeza da sala por parte dos funcionários. Neste ensaio não é atingido um equilíbrio no nível de concentração de CO₂ uma vez que o decaimento da curva é interrompido com o início das aulas do dia 23 de novembro às 08h00.

Os valores obtidos para a humidade relativa e para a temperatura revelam uma pequena variação durante as horas em que estão a decorrer aulas mas atingem um valor aproximadamente constante no restante registo, de 57% e 21°C respetivamente.

O valor registado para a concentração exterior de CO₂, recolhido no dia 22 de novembro, foi de 512 ppm e na recolha preliminar da concentração de CO₂ realizada após uma aula, foi registado um valor de 2568 ppm.

Ao analisar a sala obteve-se uma constante de tempo nominal, τ_n , de 11,11 h sendo escolhido o troço das 19h17 às 07h00, com a duração de 11,7 horas. Com o logaritmo natural da concentração, C , efetuou-se uma regressão linear e obteve-se a equação representada na Figura 5.18. Esta equação tem um coeficiente de determinação, R^2 , de 0,9976 e um declive, que representa as R_{ph} , de 0,09 h⁻¹.

A determinação das R_{ph} , através do cálculo da média dos módulos dos declives entre medições consecutivas, originou um valor de 0,09 h⁻¹.

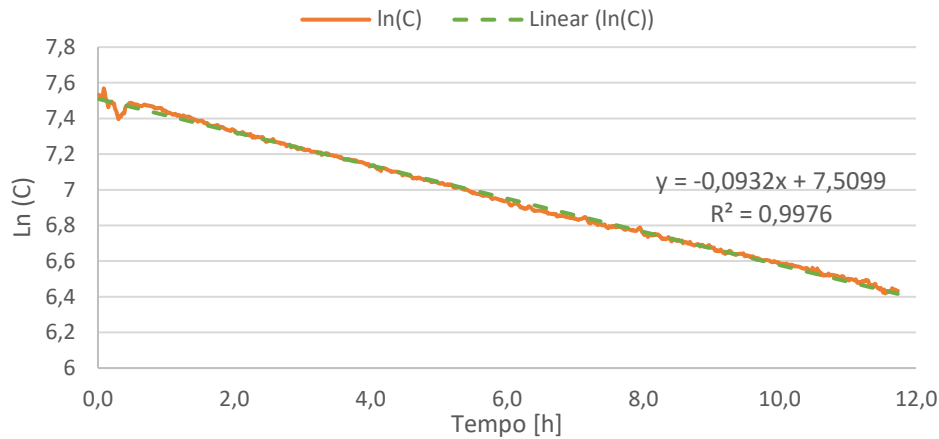


Figura 5.18 – Gráfico da regressão linear da sala IX_4.15

A Figura 5.19 mostra o desenvolvimento da curva experimental comparativamente às curvas teóricas obtidas pela equação (3.2) com as R_{ph} determinadas. Ao analisar a figura torna-se possível verificar uma aproximação satisfatória da curva teórica à curva experimental.

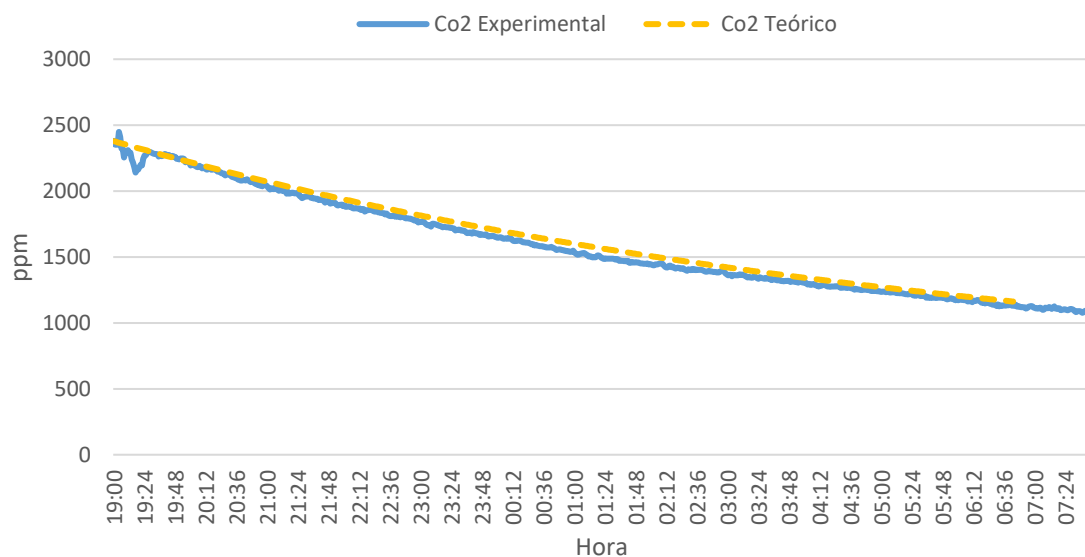


Figura 5.19 – Representação da curva experimental e da curva teórica de concentração de CO₂ da sala IX_4.15

Sala 4.23

Na Figura 5.20 são apresentados os dados recolhidos no ensaio da sala IX_4.23 que decorreram no dia 7, 8 e 9 de dezembro de 2016, de quarta a sexta-feira. Este ensaio teve uma maior duração por ter sido feriado no dia 8 de dezembro e o edifício se encontrar fechado.

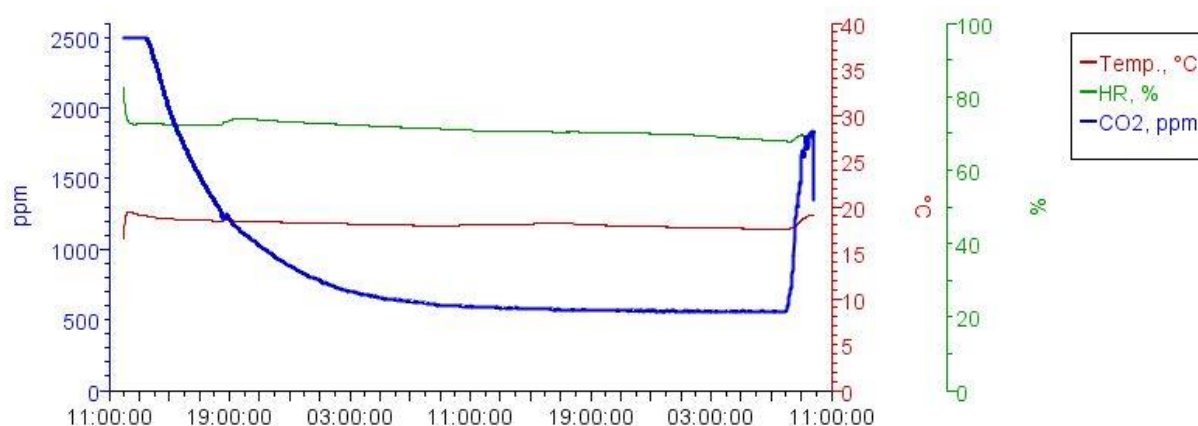


Figura 5.20 – Dados recolhidos nos dias 7, 8 e 9 de dezembro de 2016 na sala IX_4.23

Devido à utilização dos aparelhos de medição para ensaios noutras salas, apenas foi possível proceder à sua instalação, na sala IX_4.23, após o final da última aula do dia 7, às 12h00. Foram fechadas todas as portas e janelas e iniciou-se o período de declive da concentração de CO₂. Uma vez que a última aula do dia não coincidiu com a hora de encerramento do edifício, foi pedido aos seguranças que trancassem a porta da sala para que esta não pudesse voltar a ser utilizada pelos alunos como sala de estudo enquanto decorria o ensaio. O equilíbrio da concentração de CO₂ é atingido às 07h30 do dia 8 com um valor aproximadamente de 620 ppm.

Os valores obtidos para a humidade relativa e para a temperatura indicam uma pequena flutuação durante as horas em que estão a decorrer aulas mas atingem um valor aproximadamente constante no restante registo, de 72% e 18°C respetivamente.

O valor registado para a concentração exterior de CO₂, recolhido no dia 7 de dezembro, foi de 534 ppm e na recolha preliminar da concentração de CO₂, realizada após uma aula, foi registado um valor de 1635 ppm.

Na análise à sala obteve-se uma constante de tempo nominal, τ_n , de 5,56 h e foi escolhido o troço das 13h30 às 19h30, com a duração de 6 horas. Efetuando o logaritmo natural da concentração, foi possível efetuar uma regressão linear e obter a equação representada na Figura 5.21. Esta equação tem um coeficiente de determinação, R^2 , de 0,9982 e um declive, que representa as R_{ph} , de 0,2 h⁻¹.

A determinação das R_{ph} através do cálculo da média dos módulos dos declives entre medições consecutivas originou um valor de 0,18 h⁻¹.

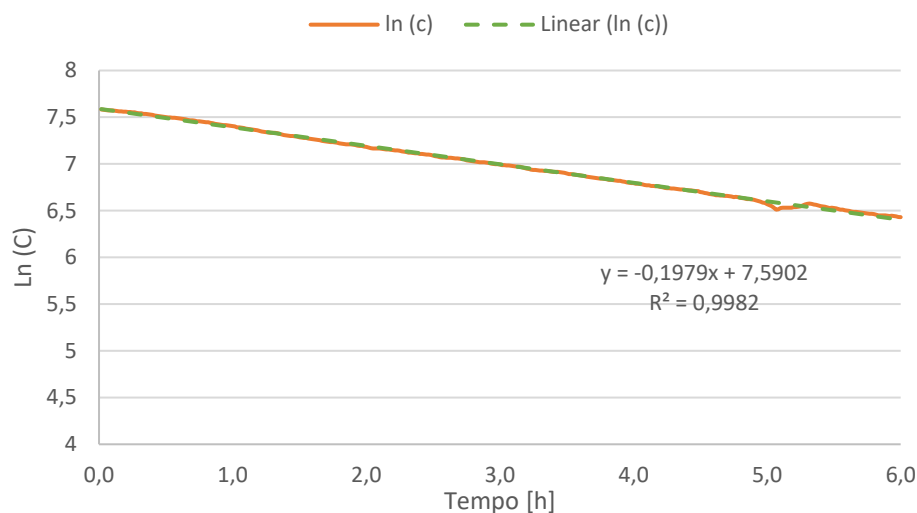


Figura 5.21 – Gráfico da regressão linear da sala IX_4.23

Por forma a verificar as R_{ph} obtidas, foram desenhadas duas curvas teóricas recorrendo à equação (3.2). Os resultados encontram-se representados na Figura 5.22 e evidenciam uma aproximação satisfatória da curva teórica à curva experimental.

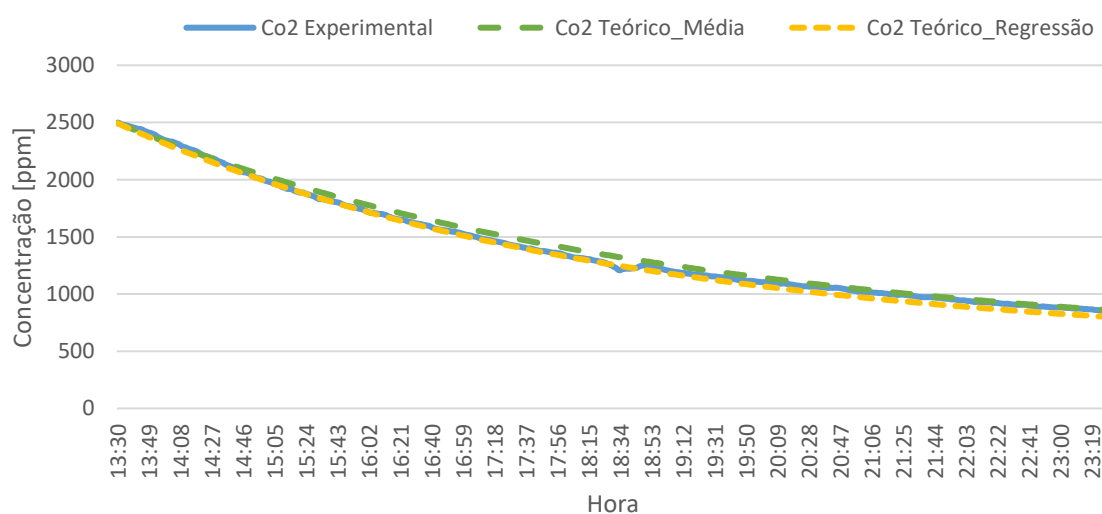


Figura 5.22 – Representação da curva experimental e da curva teórica de concentração de CO₂ da sala IX_4.23

5.2 Análise Comparativa com a Regulamentação em Vigor

A legislação portuguesa estipula um caudal mínimo de ar novo que é determinado em função da carga poluente devido à ocupação. No caso em estudo, para salas de aula onde os ocupantes executam atividades sedentárias, o caudal mínimo é de 24 [m³/(hora·pessoa)]. É necessário por isso, fazer a conversão das unidades das taxas de renovação horária para melhor se comparar os dados. No Quadro 5.1 apresenta-se a média entre as R_{ph} obtidas pelo método da regressão linear e as R_{ph} obtidas através do cálculo da média dos módulos dos declives entre medições consecutivas.

Quadro 5.1 – Valores médios das renovações por hora das salas em estudo.

Edifício	Sala	Rph experimentais [h ⁻¹]		
		Regressão Linear	Média dos módulos dos declives	Valor médio final
VIII	3.4	0,35	0,32	0,34
VIII	3.9	0,44	0,39	0,42
VIII	4.6	x	x	x
VIII	4.8	0,60	0,42	0,51
IX	2.23	0,64	0,70	0,67
IX	3.19	0,10	0,07	0,08
IX	4.15	0,09	0,09	0,09
IX	4.23	0,20	0,18	0,19

De forma a efetuar uma análise mais detalhada dos dados obtidos, realizou-se o levantamento do número de alunos inscritos em cada disciplina por sala e dia da semana, durante o período de novembro a dezembro de 2016, tal como mostra o Quadro 5.2.

Quadro 5.2 – Número de alunos inscritos, no período de novembro a dezembro de 2016, nas disciplinas lecionadas nas salas estudadas.

	Sala	2ª		3ª		4ª		5ª		6ª	
		Disciplina	Nº de Alunos	Disciplina	Nº de Alunos	Disciplina	Nº de Alunos	Disciplina	Nº de Alunos	Disciplina	Nº de Alunos
Edifício VIII	3.4	OSF	27	DCM	29	IMN	35	CES	31	DFI	36
		ALGA	26	AM I	33			CES	31	QP	41
		AM I	23	GEI	25			CES	33		
		MI	26					END	29		
	3.9	PIC	80	MAI	51	TMP	50	TMP	50	Eltm	90
		PM	100	MAI	127	Erg	90	IPM	113	TLQ	60
		DFI	70	MAI	114			FGM	74	TLQ	44
				MH	49			TC	37		
	4.6	MS	21	MS	25	-	0	GERE	5	Nf	19
				MS	23			MEG	6	Nf	19
	4.8							GEI	31	Nf	19
		TC	121	MS 1	62	EG	100	GEI	31	MS.c	86
		TMP	51	TFS	81	EA	40	CAC	39	RMt.1	95
		F1	97	EA	12			OG	87	MS1	49
Edifício IX	2.23	QC	70					FGM	37		
								FGM	38		
		P	24	VC	26	DCR	25	EsMt	21	CLA	32
		CLA	32	PRP	19	OG	24	EsMt	23	DCR	19
	3.19	DCR	24	FMS	2			SE	4		
		DCR	24					OG	21		
		PC	44	RMat	49	FC	23	RMat	49	IP	50
		OMI	46	VC	68	ProjCont	21	VC	68	Prj II	16
	4.15	SS	50	TC	38			IMN	30		
		OG	23	TC	36			PEBio	26		
								PAiS	13		
		RMt.1	27	ProjEstr.	12	MC	18	MC.1	23	RMt.1	25
Edifício IX	4.23	TE	29	TE	30	BA 1	14	RE	51	ProjEstr	12
				RRE	13	BA 1	30			RRE	29
						RMat	48				
		-	0	MC. 1	22	MS.c	22	FC	31	IP	26
				AE1	21					RE	23

Recorrendo aos valores médios das R_{ph} apresentados no Quadro 5.1 e ao número de alunos inscritos em cada disciplina, como mostra o Quadro 5.2, realizou-se uma conversão de unidades e posterior comparação com a regulamentação portuguesa em vigor.

As três figuras seguintes representam o caudal de ar novo disponível para cada ocupante nas salas do Edifício VIII ao longo da semana e durante o período de aulas.

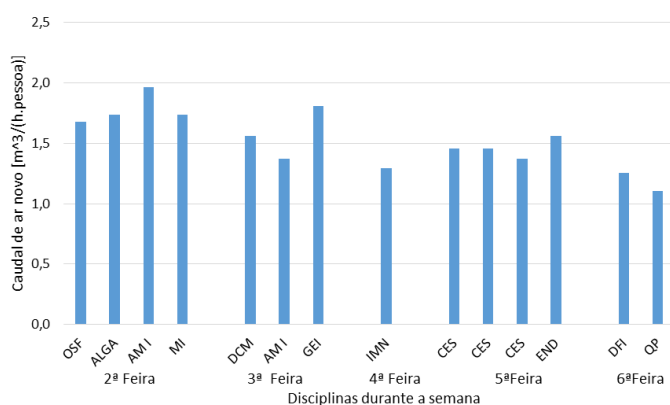


Figura 5.23 - Representação da evolução de caudal de ar novo, disponível para cada pessoa, na Sala VIII_3.4 ao longo da semana.

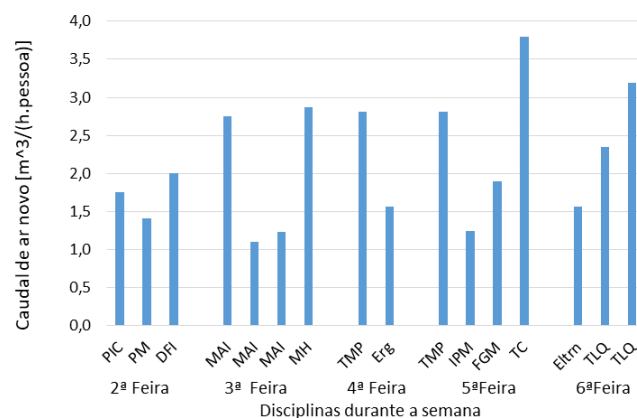


Figura 5.24 - Representação da evolução de caudal de ar novo, disponível para cada pessoa, na Sala VIII_3.9 ao longo da semana.

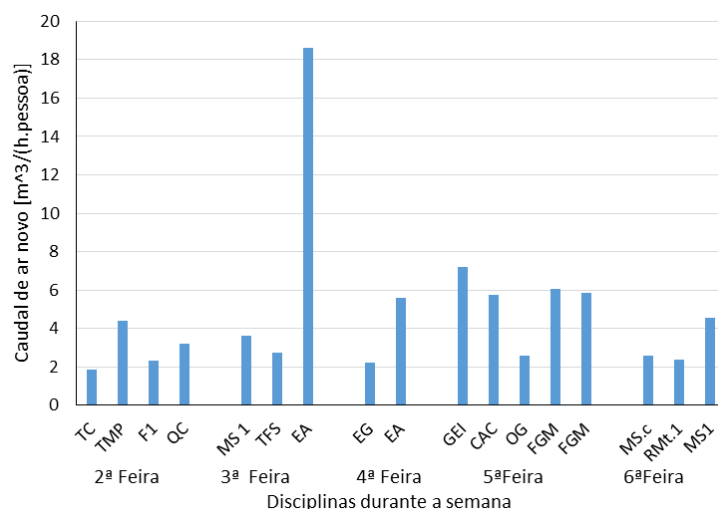


Figura 5.25 - Representação da evolução de caudal de ar novo, disponível para cada pessoa, na Sala VIII_4.8 ao longo da semana.

Analisando as figuras é possível perceber que para a mesma sala existe uma variação de caudal consoante a aula e o dia da semana. Esta particularidade prende-se com a diferença do número de ocupantes de cada sala consoante a disciplina lecionada.

No caso da Sala VIII_3.4 verifica-se que existe pouca flutuação quanto ao caudal de ar novo disponível por ocupante, uma vez que o seu perfil de ocupação é muito constante entre disciplinas lecionadas no mesmo dia. Existe, contudo, uma variação quanto ao número de alunos inscritos nas disciplinas ao longo da semana, entre 23 e 41. Isto faz com que o caudal de ar novo disponível para cada ocupante varie entre 1 e 2 m³/h ao longo de toda a semana.

No extremo oposto posicionam-se os casos das Salas VIII_3.9 e VIII_4.8 representadas nas Figuras 5.24 e 5.25, respetivamente. Ao analisar estas figuras constata-se a existência de uma grande variação de caudal de ar novo disponível ao longo de toda a semana, assim como ao longo de cada dia. Por exemplo, na terça-feira da Sala VIII_4.8, pode observar-se que numa aula o caudal de ar novo disponível é de cerca de 3 m³/(h.pessoa), passando para 18 m³/(h.pessoa) na aula seguinte. Esta variação está, como anteriormente referido, diretamente relacionada com o número de alunos inscritos por disciplina, uma vez que se verifica uma alteração na ocupação da sala de 81 alunos para uma ocupação de apenas 12 na aula seguinte.

À semelhança do anteriormente exposto, as figuras seguintes representam o caudal de ar novo disponível para cada ocupante das salas do Edifício IX, ao longo da semana e durante o período de aulas.

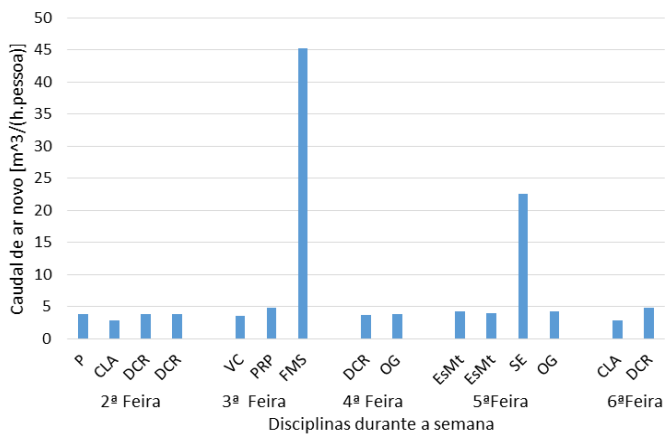


Figura 5.26 - Representação da evolução de caudal de ar novo, disponível para cada pessoa, na Sala IX_2.23 ao longo da semana.

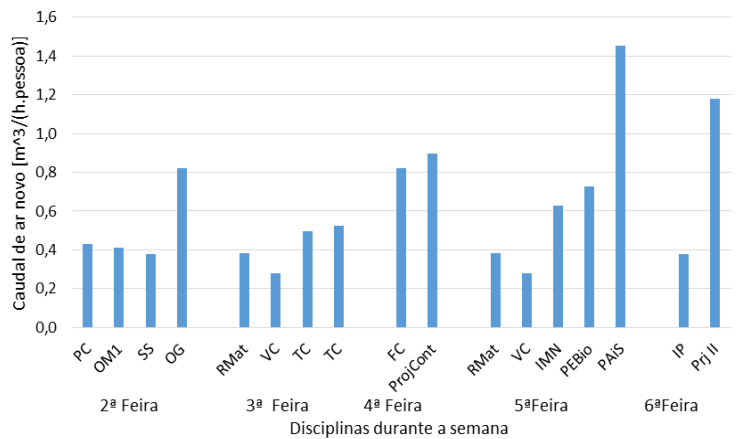


Figura 5.27 - Representação da evolução de caudal de ar novo, disponível para cada pessoa, na Sala IX_3.19 ao longo da semana.

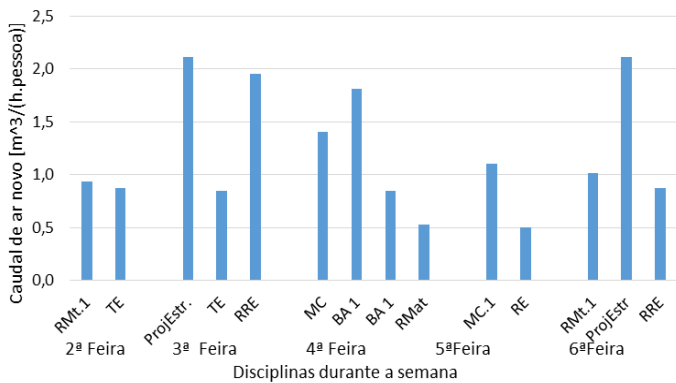


Figura 5.28 - Representação da evolução de caudal de ar novo, disponível para cada pessoa, na Sala IX_4.15 ao longo da semana.

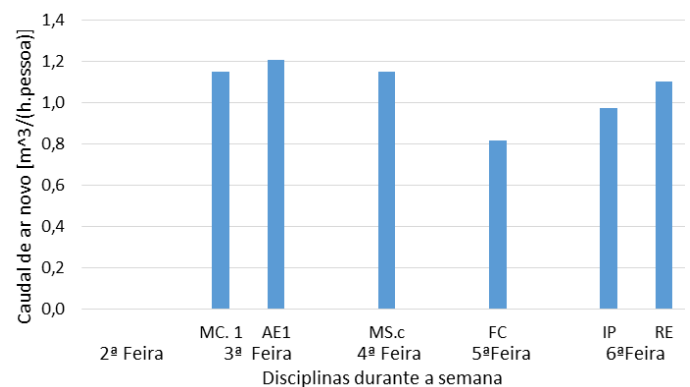


Figura 5.29 - Representação da evolução de caudal de ar novo, disponível para cada pessoa, na Sala IX_4.23 ao longo da semana.

Analisando as Figuras 5.26, 5.27, 5.28 e 5.29, apenas a Sala IX_4.23 apresenta um caudal de ar novo disponível por ocupante praticamente constante ao longo da semana, variando de 0,8 a 1,2 m³/(h.pessoa).

A Sala IX_2.23, representada na Figura 5.26, apresenta a particularidade de possuir dois momentos ao longo da semana onde o caudal de ar novo disponível por ocupante é muito superior ao considerado característico naquela sala. Estes dois momentos referem-se a situações onde a disciplina lecionada apresenta um número de alunos inscritos muito inferior quando comparado com as restantes aulas daquela sala, 2 alunos para a disciplina de FMS e 4 alunos para a disciplina de SE.

As restantes salas analisadas do Edifício IX – 3.19 e 4.15 – apresentam uma grande variação no caudal de ar novo disponível por ocupante ao longo de toda a semana, existindo uma variação de 0,3 a 1,4 m³/(h·pessoa) no caso da Sala IX_3.19 e de 0,5 a 2,1 m³/(h·pessoa) no caso da Sala IX_4.15.

A relação entre o caudal de ar novo disponível e o perfil de ocupação das salas assume especial importância para esta tipologia de edifícios, onde existe uma variação significativa no número de ocupantes das salas consoante a hora e o dia da semana. Esta relação acontece porque, a grande variação do número de ocupantes no espaço pode conduzir à passagem de uma situação de cumprimento com a legislação atualmente em vigor para uma situação de incumprimento num espaço de minutos, como apresentado na Figura 5.26 referente à Sala IX_2.23.

Como já referido, a legislação portuguesa estipula um caudal de ar novo mínimo de 24 m³/(h·pessoa) para um nível de atividade sedentário. De acordo com a análise das salas do Edifício VIII e do Edifício IX torna-se fácil perceber que os valores obtidos estão longe do exigido pela lei portuguesa. A única situação onde o caudal de ar novo mínimo foi garantido ocorreu na Sala IX_2.23 na disciplina de FMS que possuía uma ocupação de 2 pessoas. Contudo, as aulas com este número de participantes correspondem a uma situação atípica em qualquer sala de aula, por isso esta situação não deve ser assumida como um caso de sucesso. Outros casos em que o valor de caudal de ar novo por ocupante atingiu valores próximos dos regulamentados ocorreu na Sala VIII_4.8 na disciplina de EA e, novamente, na Sala IX_2.23 na disciplina de SE que possuíam 18,6 e 22,6 m³/(h·pessoa) respetivamente.

De forma a complementar a análise das salas estudadas, realizou-se o Quadro 5.3 onde se apresenta o caudal de ar novo médio por ocupante para os casos de ocupação média e máxima de cada sala, comparando, mais uma vez, com a legislação atualmente em vigor em Portugal.

Quadro 5.3 – Comparação dos caudais de ar novo por ocupante com a regulamentação portuguesa.

Edifício	Sala	Ocupação das salas [nº pessoas]		Caudal de ar novo médio por ocupante [m³/(pessoa. hora)]		
		Média	Máxima	Ocup. Média	Ocup. Máxima	Regulamentar
VIII	3.4	32	38	1,40	1,19	24
VIII	3.9	74	101	1,89	1,39	
VIII	4.6	19	28	x	x	
VIII	4.8	66	94	3,39	2,38	
IX	2.23	22	33	4,19	2,7	
IX	3.19	36	56	0,53	0,34	
IX	4.15	27	50	0,95	0,51	
IX	4.23	23	28	1,11	0,90	

O Quadro 5.3 mostra o caudal de ar novo por ocupante admitido em cada sala para uma ocupação média e para uma ocupação máxima, tendo em conta o valor médio das R_{ph} . Analisando os valores, torna-se evidente que nenhuma das salas cumpre com a regulamentação, sendo que todos os caudais se encontram muito abaixo do mínimo regulamentado.

A sala IX_3.19 destaca-se como sendo aquela com piores valores de caudais de ar novo admitidos com 0,53 m³/(pessoa. hora) para uma ocupação média da sala, 36 pessoas presentes no espaço, e com 0,34 m³/(pessoa. hora) para uma ocupação máxima da sala, que corresponde a 56 pessoas.

A sala IX_2.23, apesar de possuir valores reduzidos de caudais de ar novo admitidos, foi a que obteve melhores resultados. Para uma ocupação média, que corresponde a 22 pessoas, apresenta um caudal de 4,19 m³/(pessoa. hora) e para uma ocupação máxima, que corresponde a 33 pessoas, manifesta um caudal de 2,7 m³/(pessoa. hora). Este ligeiro aumento deve-se, muito provavelmente, às características arquitetónicas e à disposição e tipologia das janelas da sala de aula, pois promovem uma melhor admissão de ar proveniente do exterior, como representado na Figura 4.6.

O Quadro 5.4 complementa o estudo da comparação dos dados obtidos com a legislação em vigor, confrontando as R_{ph} experimentais com as R_{ph} necessárias para que se cumpram os caudais de ar novo mínimo.

Quadro 5.4 – Comparação das R_{ph} experimentais e as R_{ph} necessárias para cumprir legislação

Edifício	Sala	R_{ph} experimental [h ⁻¹]	Taxa de Ventilação Regulamentar			
			Ocupação		R_{ph} [h ⁻¹]	
			Média	Máxima	Ocup. Média	Ocup. Máxima
VIII	3.4	0,34	32	38	5,75	6,77
VIII	3.9	0,42	74	101	5,28	7,18
VIII	4.6	x	19	28	x	x
VIII	4.8	0,51	66	94	3,61	5,15
IX	2.23	0,67	22	33	3,83	5,86
IX	3.19	0,08	36	56	3,86	6,03
IX	4.15	0,09	27	50	2,34	4,41
IX	4.23	0,19	23	28	4,12	5,06

Analisando os dados das taxas de ventilação necessárias para que se cumpra a regulamentação é possível constatar que os valores referentes à ocupação média se aproximam muito das quatro renovações por hora defendidas como exigências mínimas de renovação de ar para compartimentos de serviço na norma NP 1037-1.

5.3 Análise dos Resultados Concentração de Dióxido de Carbono

Em Portugal o limiar de proteção é definido no RECS por 1250 ppm, sendo este valor indispensável para a análise das concentrações de CO₂. Por outro lado, a ASTM define como limite máximo de segurança para exposição de CO₂ 5000ppm. Considerando estes limites, elaborou-se a Figura 5.30 que apresenta as concentrações de CO₂ detetadas, em cada sala, nas medições preliminares e a máxima concentração registada durante o ensaio. Estes dados encontram-se comparados com os limites estipulados pelo RECS e pela ASTM.

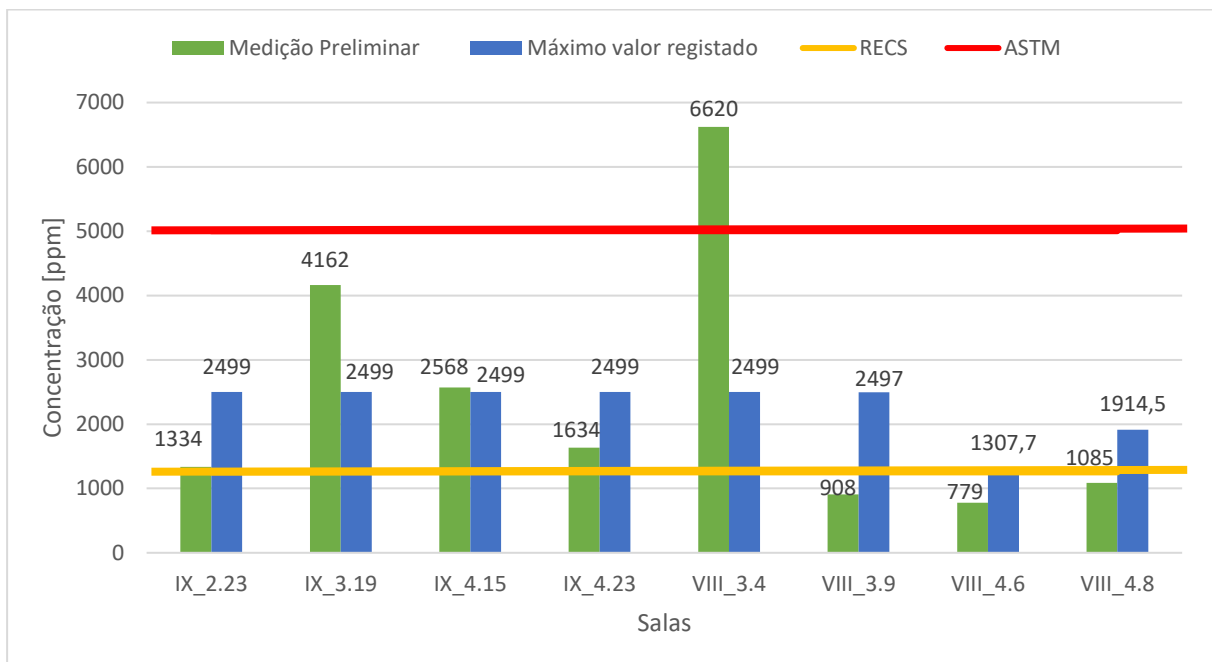


Figura 5.30 – Comparação das concentrações de CO₂ medidas nos ensaios com os limites estabelecidos pela RECS e pela ASTM.

Ao analisar a Figura 5.30 é possível verificar que todas as salas estudadas ultrapassam o limite das 1250 ppm de concentração de CO₂. No decorrer das aulas percebeu-se que este limite era facilmente atingido e ultrapassado, principalmente, devido ao tipo de utilização das salas de aula onde existiam períodos com uma ocupação muito elevada seguidos de períodos com pouca ou nenhuma ocupação. Revela-se, também, preocupante a existência de registos de CO₂ superiores ao limite estipulado pela ASTM, o que representa uma situação de perigo para a saúde dos utentes. Esta ocorrência verificou-se, apenas, na sala VIII_3.4 contudo, não é possível afirmar que se trata de um caso isolado, uma vez que o aparelho de medição se limita a gravar níveis de CO₂ até aos 2500 ppm e as concentrações de CO₂ registadas que correspondem a valores superiores são provenientes de medições espontâneas.

De forma a aferir, teoricamente, o desenvolvimento das concentrações de CO₂ atingidas no decurso de uma aula, elaboraram-se os gráficos expostos nas Figuras 5.31, 5.32, 5.33, 5.34, 5.35, 5.36 e 5.37. Na construção destes gráficos recorreu-se à equação (3.8) e ao número médio de alunos inscritos nas disciplinas lecionadas nas salas estudadas. Para o cálculo de produção de CO₂ utilizou-se a equação (3.12), servindo-se dos Quadros 3.2 e 3.3 para determinar a taxa de metabolismo e a área de Dubois dos ocupantes, 1,2 met e 1,8 m² respetivamente.

As Figuras 5.31, 5.32 e 5.33 dizem respeito às salas do Edifício VIII onde é possível comparar as curvas de concentração de CO₂ referentes a diferentes taxas de ventilação, nomeadamente: a taxa de renovação horária calculada experimentalmente, representada a vermelho; a taxa de renovação horária de referência recomendada pelo RCCTE, representada a amarelo; e a taxa de renovação horária necessária para que seja cumprido o nível máximo de concentração de CO₂, 1250 ppm, representada a preto. Os valores máximos medidos na campanha preliminar e nos ensaios das salas foram, também, adicionados de forma a efetuar uma melhor análise dos dados.

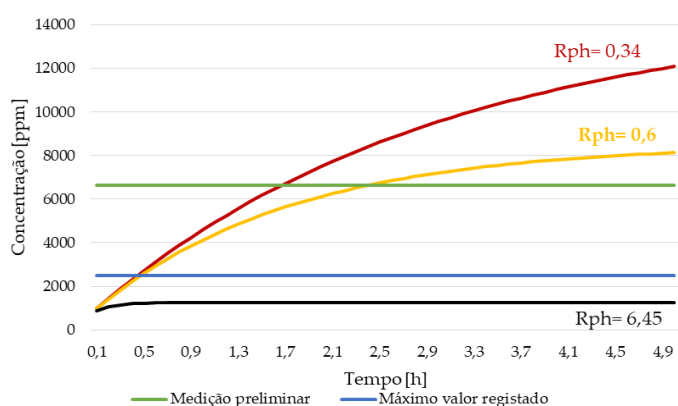


Figura 5.31 – Representação de curvas de concentração de CO₂ para diferentes taxas de renovação horária na Sala VIII_3.4.

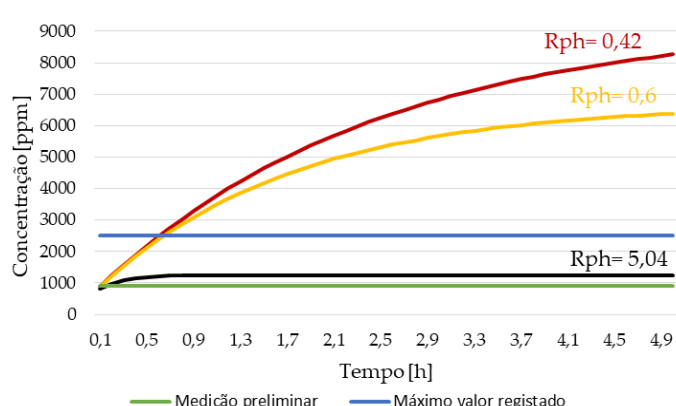


Figura 5.32 – Representação de curvas de concentração de CO₂ para diferentes taxas de renovação horária na Sala VIII_3.9.

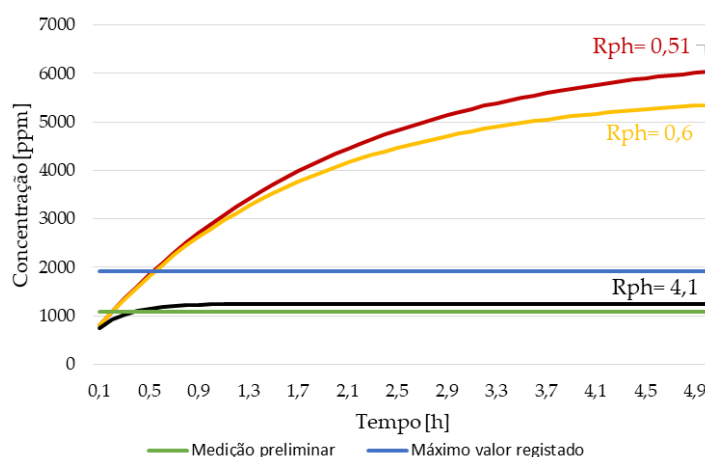


Figura 5.33 – Representação de curvas de concentração de CO₂ para diferentes taxas de renovação horária na Sala VIII_4.8.

Para a Sala VIII_3.4, representada na Figura 5.31, o número médio de alunos inscritos em cada disciplina é de 32, o que origina uma taxa de produção de CO₂ de 0,65 m³/h. As curvas

teóricas referentes às taxas de renovação horária de 0,34 e 0,6 h⁻¹ atingem uma concentração constante de 14600 e 8500 ppm, ultrapassando o valor limite de concentração de CO₂ estipulado por lei em apenas 10 minutos. Apesar do valor elevado de concentração de equilíbrio, as medições registadas não foram além das 2500 ppm. Contudo, após a análise da Figura 5.1, torna-se evidente que este valor seria consideravelmente superior ao registado se não existisse a limitação do aparelho de medição.

Relativamente à Sala VIII_3.9, representada na Figura 5.32, o número médio de alunos inscritos é de 74, originando uma taxa de produção de CO₂ de 1,25 m³/h. As curvas teóricas referentes às taxas de renovação horária de 0,42 e 0,6 h⁻¹ atingem uma concentração constante de 9300 e 6700 ppm, ultrapassando o valor limite de concentração de CO₂ estipulado por lei em apenas 13 minutos. O maior registo de CO₂ foi de 2497 ppm sendo que na medição preliminar apenas se registou 908 ppm. Todavia, é importante referir que o registo efetuado na medição preliminar realizou-se após uma aula que possuía uma grande percentagem de janelas abertas, podendo ser um indicador de desconforto sensorial causado nos ocupantes quando estes entraram na sala para terem a sua aula.

Por último, o número médio de alunos inscritos por disciplina na Sala VIII_4.8, representada na Figura 5.33, é de 66 provocando uma taxa de produção de CO₂ de 1,34 m³/h. As curvas teóricas referentes às taxas de renovação horária de 0,51 e 0,6 h⁻¹ atingem uma concentração constante de 6500 e 5600 ppm, ultrapassando o valor limite de concentração de CO₂ estipulado por lei em apenas 17 minutos. O maior registo de CO₂ foi de 1914 ppm sendo que na medição preliminar apenas se registou 1085 ppm.

O mesmo procedimento de análise realizado para a salas do Edifício VIII concretizou-se para as salas do Edifício IX que estão representadas nas Figuras 5.34, 5.35, 5.36 e 5.37.

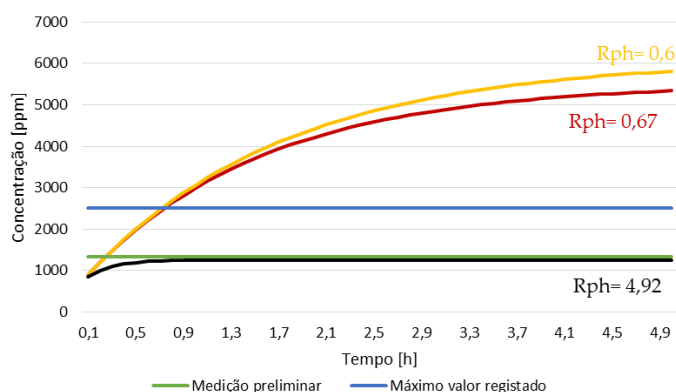


Figura 5.34 – Representação de curvas de concentração de CO₂ para diferentes taxas de renovação horária na Sala IX_2.23.

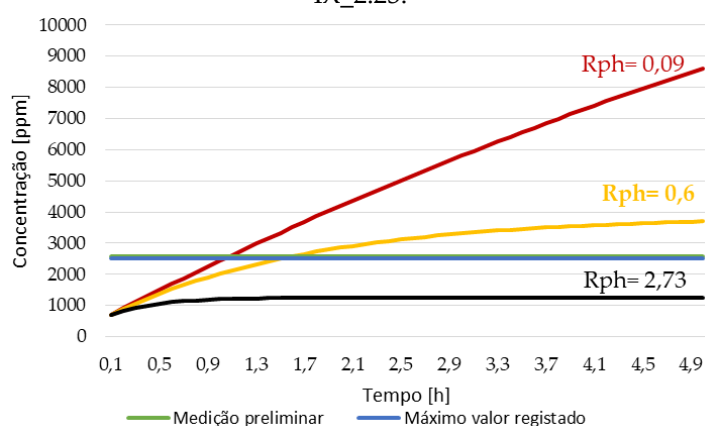


Figura 5.36 – Representação de curvas de concentração de CO₂ para diferentes taxas de renovação horária na Sala IX_4.15.

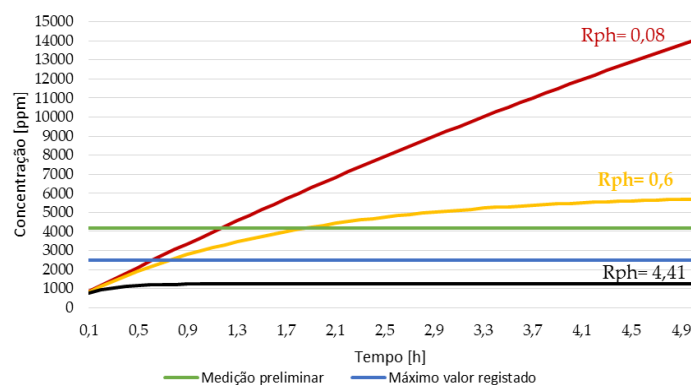


Figura 5.35 – Representação de curvas de concentração de CO₂ para diferentes taxas de renovação horária na Sala IX_3.19.

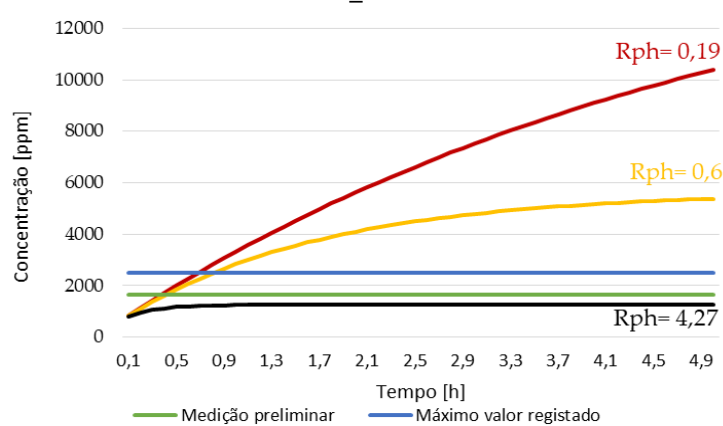


Figura 5.37 – Representação de curvas de concentração de CO₂ para diferentes taxas de renovação horária na Sala IX_4.23.

Na Sala IX_2.23, representada na Figura 5.34, apresenta-se uma taxa de produção de CO₂ de 0,45 m³/h, causada por uma ocupação média de 22 alunos. As curvas teóricas referentes às taxas de renovação horária de 0,67 e 0,6 h⁻¹ atingem uma concentração constante de 5500 e 6090 ppm, ultrapassando o valor limite de concentração de CO₂ estipulado por lei em apenas 14 minutos. Apesar do valor elevado de concentração de equilíbrio, as medições registadas não foram além das 2500 ppm, tendo a medição preliminar registado 1334 ppm. Em oposição à situação da Sala VIII_3.4 e analisando a Figura 5.11, verifica-se que para o período de tempo estudado não se iriam obter concentrações de CO₂ muito acima das registadas.

Quanto à Sala IX_3.19, representada na Figura 5.35, o número médio de alunos inscritos é de 36, originando uma taxa de produção de CO₂ de 0,73 m³/h. As curvas teóricas referentes às taxas de renovação horária de 0,08 e 0,6 h⁻¹ atingem uma concentração constante de 41400 e 5900 ppm, ultrapassando o valor limite de concentração de CO₂ estipulado pela lei em apenas

15 minutos. Apesar de o valor de concentração de equilíbrio teórico ser muito elevado, o maior registo de CO₂ ocorreu durante a medição preliminar onde se obteve um valor de 4162ppm. Durante o ensaio, e devido às limitações do aparelho, o valor máximo de concentração registado foi de 2500 ppm tornando-se claro, após a análise da Figura 5.14, que a concentração de CO₂ alcançaria valores próximos dos registados durante as medições preliminares.

O número médio de alunos inscritos por disciplina na Sala IX_4.15, representada na Figura 5.36, é de 27 provocando uma taxa de produção de CO₂ de 0,55 m³/h. As curvas teóricas referentes às taxas de renovação horária de 0,09 e 0,6 h⁻¹ atingem uma concentração constante de 22800 e 3800 ppm, ultrapassando o valor limite de concentração de CO₂ estipulado por lei em apenas 25 minutos. O maior registo de CO₂ foi de 2568 ppm durante a medição preliminar, contudo, após a análise da Figura 5.14, torna-se evidente que este valor seria consideravelmente superior ao registado se não existisse a limitação de medição do aparelho.

Relativamente à Sala IX_4.23, representada na Figura 5.37, obteve-se uma taxa de produção de CO₂ de 0,41 m³/h, causada por uma ocupação média de 20 alunos. As curvas teóricas referentes às taxas de renovação horária de 0,19 e 0,6 h⁻¹ atingem uma concentração constante de 16600 e 5600 ppm, ultrapassando o valor limite de concentração de CO₂ estipulado por lei em apenas 16 minutos. Apesar do valor elevado de concentração de equilíbrio, as medições registadas não foram além das 2500ppm, tendo a medição preliminar registado 1634 ppm. Analisando a Figura 5.20 verifica-se que para o período de tempo estudado não se iriam verificar concentrações de CO₂ muito acima das registadas.

Tal como acima referido, as três curvas de concentração de CO₂ apresentadas correspondem a: curvas teóricas elaboradas através das taxas de renovação horária obtidas experimentalmente; curvas teóricas com a R_{ph} recomendada pelo RCCTE; e a curvas necessárias para cumprir o limite de concentração de CO₂ legislado. É de referir que os valores teóricos apresentados referentes às concentrações de equilíbrio não devem ser confundidos com os valores registados experimentalmente, quer durante a campanha de medições preliminar quer durante os ensaios.

Em suma, revela-se importante salientar que concentrações elevadas de CO₂ exprimem uma fraca qualidade do ar que se manifesta nos ocupantes, de forma mais imediata, com desconforto através do olfato. Devido à duração das aulas, entre 1h30min e 2h, e à constante troca de alunos entre salas, o olfato dos ocupantes que entram nas aulas assume uma influência

importante no controlo dos níveis de CO₂, uma vez que o desconforto causado por um ar saturado vai conduzir à abertura das janelas, permitindo um aumento dos caudais de ar novo disponíveis. Situação esta já explicada na análise efetuada à Figura 5.32 referente à Sala VIII_3.9.

Capítulo 6

Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

A realização desta dissertação teve como objetivo principal a determinação experimental de taxas de renovação horária de salas de aula de dois edifícios da FCT/UNL. As taxas de renovação horária obtidas e os níveis de concentração de CO₂ registados foram comparados com os requisitos presentes na legislação em vigor. Para isso, foi desenvolvida uma campanha experimental, utilizando o Método do Gás Traçador e a Técnica do Decaimento.

Na interpretação dos resultados deste estudo é importante ter presente que num compartimento naturalmente ventilado a taxa de renovação do ar pode sofrer grandes variações diárias, quer devido a alterações nas condições atmosféricas, quer devido à abertura de portas ou janelas. Por este motivo o valor de R_{ph} determinado num intervalo de tempo sob condições definidas é válido apenas para esse mesmo intervalo, não sendo correto admitir a sua generalização a outros períodos de tempo, ainda que semelhantes. No entanto, nos ensaios realizados, procurou-se manter as condições típicas de utilização das salas de aula permitindo que os resultados obtidos pudessem ser considerados como representativos do comportamento típico das mesmas.

Na grande maioria dos gráficos, construídos através dos ensaios realizados, obtiveram-se boas aproximações das linhas de regressão linear às respetivas nuvens de pontos, alcançando no coeficiente de determinação, R^2 , valores próximos do máximo. Deste modo, demonstra-se que a maioria dos ensaios foram bem-sucedidos, permitindo assim chegar a resultados válidos.

Através deste estudo constatou-se que, nos períodos analisados, todas as salas de aula beneficiaram de taxas de renovação de ar inferiores aos valores regulamentados e os registos das concentrações de CO₂ durante os ensaios ultrapassam, de forma frequente, o limite máximo estabelecido como limiar de proteção pelo RECS. Nos ensaios foram obtidos valores experimentais de taxas de renovação horária de 0,09 h⁻¹ a 0,67 h⁻¹, quando de acordo com o caudal de ar novo mínimo por ocupante regulamentado deveriam existir taxas de renovação horária de 2,34 h⁻¹ a 5,75 h⁻¹ para um nível ocupação média e de 4,41 h⁻¹ a 7,18 h⁻¹, para um nível de ocupação máxima. Relativamente à concentração de CO₂ verificou-se que o limiar de

proteção definido pelo RECS de 1250 ppm era frequentemente ultrapassado, tendo-se registado valores superiores em todas as salas de aula estudadas. Na realidade, no decorrer das aulas, seis das oito salas ultrapassaram o valor limite de concentração registado pelo aparelho, 2500 ppm, sendo que nas medições preliminares foram registados valores de concentração de CO₂ de 4162 e 6620 ppm. Houve, também, o cuidado de perceber em quanto tempo seria ultrapassado o limite de CO₂ nas salas de aula, uma vez que no caso de ser superado ao fim de 1h30 a 2h ocorreria o término da aula e, consequente, troca de ocupantes, facilitando o cumprimento do limite de concentração de CO₂. Contudo tal não aconteceu, pois, tipicamente, as salas de aula apresentam uma ocupação elevada. Esta realidade conduz a uma taxa de emissão de CO₂ significativa dentro das salas devido há grande ocupação das mesmas, sendo que o limite de CO₂ é ultrapassado num curto espaço de tempo, entre 10 a 25 minutos. Através destes dados é possível aferir a existência de uma fraca qualidade do ar dentro das salas, que é prejudicial para a saúde dos utentes. A ventilação insuficiente nas salas de aula estudadas poderá ter origem no dimensionamento inicial dos sistemas de ventilação, ou seja, conjectura-se que as salas tenham sido projetadas para a utilização de ventilação mecânica, todavia como esta se avariou as salas deixaram de conseguir respeitar as condições mínimas de ventilação e de QAI restando como alternativa de controlo a ação por parte dos ocupantes de abrir e fechar os vãos.

Os dados supra mencionados são indicadores de reduzidos caudais de ar novo admitidos e de ar viciado extraído. Tal como sucede na maioria dos edifícios construídos em Portugal, nos compartimentos em estudo não existem dispositivos de entrada permanente de ar nas fachadas, nem grelhas de passagem de ar interior. Nestas condições, quando as janelas e as portas das salas se encontram fechadas, a ventilação acontece unicamente: por infiltrações através das caixilharias, pelas condutas de ar condicionado, pelas frinchas nas portas interiores e através de outras frinchas na envolvente. De forma a colmatar este problema uma solução de melhoria imediata passa pelo arranjo do sistema AVAC. Contudo, apesar de requerer mais estudos, a primeira abordagem para a resolução do problema deveria passar pela implementação de estratégias de ventilação natural. Considerando esta abordagem, recomenda-se um estudo das soluções propostas pela norma NP 1037-1 para a admissão e exaustão de ar, como por exemplo grelhas autorreguláveis nas fachadas dos edifícios ou grelhas de passagem de ar interior instaladas nas portas e/ou paredes interiores.

Ao longo da preparação e realização da campanha experimental foram vários os problemas e dificuldades encontradas destacando-se:

- a organização de todos os horários das salas de modo a tornar a medição das salas o mais eficiente possível;
- a coordenação com as pessoas responsáveis pela segurança e pela limpeza para que os ensaios pudessem decorrer de acordo com as condições estabelecidas, portas e janelas fechadas, e de forma ininterrupta;
- o controlo e verificação da saída de todos os docentes e alunos das salas no mais curto espaço de tempo possível;
- as limitações de registo do aparelho em não ser capaz de gravar valores de concentração acima das 2500 ppm.

Para desenvolvimentos futuros seria interessante analisar e aprofundar o presente estudo, sendo possível traçar alguns caminhos:

- estudar as taxas de renovações horárias para o caso de uma percentagem das janelas abertas;
- aplicar outras técnicas de determinação das taxas de renovação horária, nomeadamente a técnica de emissão constante e a da concentração constante, por forma a entender o comportamento das R_{ph} das salas ao longo de todo o dia;
- alargar o estudo para as salas laboratoriais, gabinetes, auditórios e biblioteca;
- alargar o estudo para outras universidades noutras zonas do país;
- estudar alternativas de melhoria da ventilação natural nas salas.

Por fim sugere-se o desenvolvimento de um manual de utilização tipo, com a indicação da forma mais adequada de atuação dos ocupantes, no que respeita à abertura de janelas e à utilização de sistemas de sombreamento dos edifícios.

Referências Bibliográficas

- [1] T. Kojima e B. Harrison, *The Carbon Dioxide Problem: Integrated Energy and Environmental Policies for the 21st Century*, Tokyo: Gordon and Breach Science Publishers, 1998.
- [2] S. R. Jurado, A. D. P. Bankoff e A. Sanchez, "Indoor Air Quality in Brazilian Universities," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 11, pp. 7081-7093, 2014.
- [3] F. Cerqueira, *Avaliação das condições de ventilação de lares de idosos*, Lisboa: Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Dissertação de Mestrado, 2015.
- [4] S. M. Almeida, N. Canha, A. Silva, M. d. C. Freitas, P. Pegas, C. Alves, M. Evtyugina e C. A. Pio, "Children exposure to atmospheric particles in indoor of Lisbon primary schools," *Atmospheric Environment*, vol. 45, pp. 7594-7599, 2011.
- [5] J. Viegas, S. Nogueira, D. Aelenei, H. Cruz e M. Cano, "Numerical evaluation of ventilation performance in children day care centres," *Building Simulation*. DOI: 10.1007/s12273-014-0202-7, 2015.
- [6] D. Aelenei, S. Nogueira, J. Viegas, M. Cano e F. Cerqueira, "Caracterização experimental das taxas de renovação horária em residências para pessoas idosas," *PATORREB 2015*, Porto, Portugal, Março 26-28. ISBN: 978-972-752-177-7., 2015.
- [7] A. Mendes, D. Aelenei, A. L. Papoila, P. Martins, L. Aguiar, C. Pereira, P. Neves, S. Azavedo, M. Cano, C. Proença, J. Viegas, S. Silva, D. Mendes, N. Neuparth e J. P. Teixeira, "Environmental and ventilation assessment in Child Day Care Centers in Porto: the ENVIRH Project," *Journal of Toxicology and Environmental Health - Part A: Current Issues*, 77(14-16):931-43. DOI: 10.1080/15287394.2014.911134, 2014.
- [8] P. Carreiro-Martins, J. Viegas, A. L. Papoila, D. Aelenei, I. Caires, J. Araújo-Martins, J. Gaspar-Marques, M. Cano, A. Mendes, D. Virella, J. Rosado-Pinto, P. Leiria-

- Pinto, I. Annesi-Maesano e N. Neuparth, "CO(2) concentration in day care centres is related to wheezing in attending children," *European Journal of Pediatrics*, 173(8):1041-9. DOI: 10.1007/s00431-014-2288-4, 2014.
- [9] J. Araújo-Martins, P. Carreiro-Martins, J. Viegas, D. Aelenei, M. Cano, J. P. Teixeira, P. Paixão, A. L. Papoila, P. Leiria-Pinto, C. Pedro, J. Rosado-Pinto, I. Annesi-Maesano e N. Neuparth, "Environment and Health in Children Day Care Centres (ENVIRH) - Study rationale and protocol," *Revista Portuguesa de Pneumologia*, S0873-2159(14)00036-1. DOI: 10.1016/j.rppneu.2014.02.006, 2014.
- [10] F. Cerqueira, S. Azevedo, D. Aelenei e J. Viegas, "Assessment of ventilation in elderly care centres," 40th IAHS World Congresso on Housing, Funchal, Portugal, Dec. 16-19., 2014.
- [11] D. Aelenei, S. Azevedo, J. Viegas, A. Mendes, A. L. Papoila, M. Cano, P. Martins e N. Neuparth, "Environment and Health in Children Day Care Centres in Portugal - results from phase II on the ventilation characteristics of 16 schools," *CLIMA 2013*, Prague, Czech Republic, June 16 -19. ISBN: 978-80-260-4001-9, 2013.
- [12] M. Cano, S. Nogueira, A. L. Papoila, F. Aguiar, P. Martins, J. Marques, I. Caires, J. Martins, C. Pedro, P. Paixão, J. Rosado-Pinto, P. Leiria-Pinto, D. Aelenei, A. Mendes, J. P. Teixeira, C. Proença e N. Neuparth, "Indoor Air Quality in Portuguese Children Day Care Centers – ENVIRH Project," *The Second International Conference on Building Energy and Environment (COBEE)*, Boulder, Colorado, USA, Aug 1-4. ISBN: 978-0-9816881-9-0; 0-9816881-9-5.
- [13] S. Azevedo, J. Viegas, D. Aelenei, A. L. Papoila e A. Mendes, "Environment and health in children day care centres results from phase I - preliminary analysis of buildings physical characteristics," *The 10th International Conference on Industrial Ventilation*, Paris, France, Sep. 17-19., 2012.
- [14] J. Viegas, D. Aelenei, S. Azevedo, H. Cruz, A. P. Santos e A. Pinto, "Environment and health in children day care centre analysis and simulation of ventilation," *The 10th International Conference on Industrial Ventilation*, Paris, France, Se. 17-19., 2012.

- [15] M. C. Freitas e N. Canha, "Indoor air quality in primary schools, Advanced Topics in Environmental Health and Air Pollution Case Studies," em *Advanced Topics in Environmental Health and Air Pollution Case Studies*, vol. 20, INTECH, 2011, pp. 361-384.
- [16] D. Amorim, Otimização das condições de ventilação natural em edifícios de serviço para assegurar a qualidade do ar interior sem consumos excessivos de energia, Minho: Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Dissertação de Mestrado, 2012.
- [17] "DGES: Direção-Geral do Ensino Superior," 2016. [Online]. Available: <http://www.dges.mctes.pt/estatisticasacesso/2016/>. [Acedido em 7 Julho 2017].
- [18] World Health Organization, Indoor air pollutants: exposure and health effects, Nördlingen: Edition ed. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 1983.
- [19] H. Awbi, Ventilation of Buildings, Londres: Spon Press, 2003.
- [20] "Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS).," Portaria nº353-A/2013, de 4 de Dezembro. Diário da República. 1ª Série, Nº235, 2013.
- [21] J. Santos, Avaliação experimental dos níveis de qualidade do ar interior em quartos de dormir: Um caso de estudo, Lisboa: Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Dissertação de Mestrado, 2008.
- [22] D. Etheridge e M. Sandberg, Building Ventilation: Theory and Measurement, England: John Wiley & Sons Ltd, 1996.
- [23] ADENE, Sistemas de Ventilação, Lisboa: ADENE, 2016.
- [24] M. Amaral, Sistemas de ventilação natural e mistos em edifícios de habitação, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Dissertação de Doutoramento, 2008.
- [25] F. Silva, Acções que promovem a ventilação natural. Ambiente em Edifícios Urbanos, Lisboa: LNEC, 2000.
- [26] NORMA PORTUGUESA 1037-1 2015, Ventilação e evacuação dos produtos da combustão dos locais com aparelhos a gás; Parte 1: Edifícios de habitação. Ventilação natural., 2015.

- [27] ASTM, Standard test method for determining air change in a single zone by means of a tracer gas dilution, E 741-00, West Conshohocken, USA: American Society for Testing Materials, 2000.
- [28] J. Sundel, H. Levin, W. W. Nazaroff, W. S. Cain, W. J. Fisk, D. T. Grimsrud, F. Gyntelberg, Y. Li, A. K. Persily, A. C. Pickering, J. M. Samet, J. D. Spengler, S. T. Taylor e C. J. Weschler, "Ventilation rates and health: multidisciplinary review of the scientific literature," *Indoor Air*, vol. 21, nº Commemorating 20 Years of Indoor Air, pp. 191- 204, 2011.
- [29] "Regulamento Geral das Edificações Urbanas (REGEU)," Decreto-Lei nº38 382 de 7 de agosto de 1951.
- [30] "Recomendações Técnicas para Habitação Social (RTHS)," Decreto-Lei nº237/85 de 5 de julho , Lisboa, 1985.
- [31] "Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE)," Diário da República, I Série - A, Decreto-Lei nº80/2006, Lisboa, 2006.
- [32] J. Viegas, Ventilação Natural de Edifícios de Habitação, LNEC, 2010.
- [33] "Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE)," Decreto-Lei nº79/2006 de 4 de abril.
- [34] Decreto-Lei nº 118/2013. D.R. 1ª Série nº159, 20 de agosto de 2013.
- [35] Comissão Setorial para a Educação e Formação, "Análise SWOT do Ensino Superior Português: oportunidades, desafios e estratégias de qualidade," Imprensa da Universidade de Coimbra, 2017.
- [36] Pordata, "PORDATA: Base de Dados Portugal Contemporâneo," PORDATA, 4 Outubro 2016. [Online]. Available: <http://www.pordata.pt/Portugal/Alunos+matriculados+no+ensino+superior+total+e+p+or+sexo-1048>. [Acedido em 7 Julho 2017].
- [37] FCT/UNL, "ENEGI Lisboa 2015," Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, 11 setembro 2015. [Online]. Available: <http://eventos.fct.unl.pt/ist-enegilisboa2015/pages/como-chegar>. [Acedido em 30 julho 2017].

- [38] FCT/UNL, “Universidade Nova de Lisboa,” [Online]. Available: <http://www.unl.pt/guia/2016/fct>. [Acedido em 1 agosto 2017].
- [39] ADENE, “Nota Técnica NT-SCE-02 - Metodologia para auditorias periódicas de QAI em edifícios de serviços existentes no âmbito do RSECE,” *Certificação Energética e Ar Interior*, 2006.
- [40] EUROPEAN STANDARD ISO 12569:2012, Thermal performance of buildings and materials - Determination of specific airflow rate in buildings - Tracer gas dilution method, 2012.
- [41] ONSET, “ONSET,” [Online]. Available: <http://www.onsetcomp.com/products/sensors/tel-7001>. [Acedido em 20 agosto 2017].
- [42] P. Wargocki e P. D. Wyon, “HVAC&R Research,” *The Effects of Moderately Raised Classroom Temperatures and Classroom Ventilation Rate on the Performance of Schoolwork by Children*, pp. 193-220, Março 2007.
- [43] A. N. Myhrvold, E. Olsen e Ø. Lauridsen, “Indoor environment in schools, pupils health and performance in regards to CO₂ concentrations,” *Proceedings of 7th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*, Nagoya, Japan, 1996.
- [44] U. Haverinen-Shaughnessy, D. J. Moschandreas e R. J. Shaughnessy, “Association between substandard classroom ventilation rates and students academic achivement,” *Indoor Air*, vol. 21, pp. 121-131, 2011.

Apêndices

Apêndice I – Ficha de levantamento das salas

Edifício:	Sala:
-----------	-------

Sala

Altura x Comp. x Largura [m]	
Volume [m ³]	
Ocupação máxima	
Ar condicionado	
Grelhas nas paredes	
Teto falso	

Planta da sala

--

Portas

Número de portas	
Tipo	
Dimensões [m]	
Vedante	
Grelha	
Altura do piso [cm]	

Janelas

Nº	1	2	3
Tipo de janela			
Tipo de vidro			
Altura x Comp. [m]			
Material de caixilharia			
Vedante			
Orientação			
Operacionais			
Sistema de sombreamento			

Medição preliminar do CO₂: _____[ppm]

Horário das aulas: